

**EVALUACIÓN DEL EFECTO CAUSADO POR LA OXIGENACIÓN DE LA
MEZCLA AIRE-COMBUSTIBLE EN LAS PRESTACIONES DE UN MOTOR
CICLO OTTO CONVERTIDO A GAS NATURAL EN LA CIUDAD DE
MONTERÍA**



LUIS ANDRÉS LÓPEZ ARGUMEDO

CARLOS ALBERTO TAPIA AGÁMEZ

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

MONTERÍA

2017

**EVALUACIÓN DEL EFECTO CAUSADO POR LA OXIGENACIÓN DE LA
MEZCLA AIRE-COMBUSTIBLE EN LAS PRESTACIONES DE UN MOTOR
CICLO OTTO CONVERTIDO A GAS NATURAL EN LA CIUDAD DE
MONTERÍA**

LUIS ANDRÉS LÓPEZ ARGUMEDO

CARLOS ALBERTO TAPIA AGÁMEZ

Proyecto de grado como requisito para optar al título de

Ingeniero Mecánico

Director:

Ing. JAIRO LUIS DURANGO PADILLA, M.Sc

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA

MONTERÍA

2017

**La responsabilidad ética, legal y científica de las ideas, conceptos y resultados del
proyecto, serán responsabilidad de los autores.**

Artículo 61, acuerdo N° 093 del 26 de noviembre de 2002 del consejo superior.

Nota de aceptación

JORGE MARIO MENDOZA FANDIÑO

Jurado

ALONSO RAFAEL PERDOMO JIMÉNEZ

Jurado

JAIRO LUIS DURANGO PADILLA

Director

DEDICATORIA

A mi Dios, Todo Poderoso, que me ha dado la Fortaleza y Paciencia para afrontar cada obstáculo en la vida.

A mis padres, que han apoyado cada una de mis decisiones, que me han ayudado a levantarme en cada caída y sobre todo han dedicado todo su esfuerzo, para que pueda ser una persona con buenos principios y costumbres.

A mis hermanos por ser tan excelentes ejemplos, por acompañarme en cada momento y por procurar guiarme por el camino correcto.

A mi familia en general por todo el apoyo y confianza depositado en mí.

A mis amigos y compañeros, que siempre me regalaron su aliento y apoyo para seguir adelante, a pesar de los tropiezos e inconvenientes.

Y también muy sentidamente a esas personas especiales que han tomado la delantera y hoy ya no están con nosotros.

Luis Andrés López Argumedo

DEDICATORIA

Primero que todo a Dios por haber estado ahí a lo largo de mi carrera, darme la fortaleza en esos días difíciles y ayudarme a culminar todos estos años de estudio exitosamente.

A mis padres Alberto Manuel y Rosiris Isabel por todo el apoyo brindado a lo largo de los años, por los valores que me han inculcado, la perseverancia que han tenido conmigo y sobre todo ser cada uno, un ejemplo de persona a seguir.

A mis hermanos, tíos y compañeros que en una u otra forma me han ayudado a salir adelante y ser una mejor persona, siendo fuente de motivación y serenidad en todas esas adversidades del día a día.

Por ultimo le quiero agradecer y dedicar este triunfo a Pao, por estar conmigo durante todo el tiempo que duró este trabajo, por escucharme, darme fuerzas y apoyarme en momentos complicados, por entenderme cuando estuve horas frente al computador estudiando, leyendo y planificando como culminar exitosamente el proyecto y no pude compartir tiempo con ella.

Carlos Alberto Tapia Agámez

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo agradecemos a Dios por la sabiduría y fortaleza regalada durante toda la carrera y para realizar este arduo trabajo. A nuestros padres, por cada voz de aliento y apoyo a lo largo de nuestras vidas y en especial durante estos últimos meses.

Agradecemos a nuestro director, el Ingeniero Jairo Durango, por su colaboración y apoyo durante todo el desarrollo del proyecto.

Por este trabajo, agradecemos a cada una de las personas que han hecho posible llegar hasta donde estamos: profesores, amigos, familiares y compañeros.

También, agradecemos a todos los recintos educativos que han abierto sus puertas para acogernos en su seno, pero en especial a la Universidad de Córdoba, que ha permitido formarnos como profesionales y en especial como personas de bien.

Al Departamento de Ingeniería Mecánica, al cuerpo de docentes por sus enseñanzas y consejos, y a las secretarías por su amabilidad y atención servicial, durante toda nuestra estancia en la universidad.

Por último, agradecemos muy encarecidamente, al señor Federico Osorio Martínez por abrirnos las puertas de su taller, Centro Gas Montería, para la realización de gran parte del proyecto. Agradecemos a su secretaria Raquel Mejía, y todos trabajadores, Pedro Durante, Luis Cuello Martínez, Omar Osorio y Alfonso Velázquez, por la asesoría y servicios técnicos prestados durante nuestra estancia en el taller.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	xv
ABSTRACT	xvii
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	3
Objetivo General	3
Objetivos Específicos y Cuadro Metodológico	3
1. Revisión de Literatura.....	4
1.1. Motores de Combustión Interna.....	4
1.1.1. Clasificación.....	4
1.1.2. Componentes básicos de MCI.....	5
1.2. Ciclo termodinámico en un motor de combustión	6
1.2.1. Ciclo Otto	6
1.3. Combustibles.....	7
1.3.1. Combustibles líquidos derivados del petróleo	8
1.3.2. Combustibles gaseosos	8
1.3.3. Poder calorífico	9
1.4. Combustión y emisiones	9
1.4.1. Estequiometría en reacciones de combustión	10
1.4.1.1. Relación aire-combustible	10
1.4.2. Emisiones	11
1.4.2.1. Hidrocarburos sin quemar (HC)	11
1.4.2.2. Óxidos Nitrosos (NO _x)	11
1.4.2.3. Monóxido carbono (CO).....	12
1.4.2.4. Dióxido de carbono (CO ₂)	12
1.5. Uso del gas natural en motores	12
1.5.1. Motores bicomcombustibles	12
1.5.2. Kit de conversión	13
1.5.3. Tecnologías disponibles para la conversión.....	14
1.5.3.1. Lazo abierto	14

1.5.3.2.	Lazo cerrado	14
1.5.3.3.	Tecnología de inyección secuencial	14
2.	Materiales y Métodos	15
2.1.	Motor empleado para el desarrollo del Proyecto	15
2.2.	Ajustes generales de la planta eléctrica.....	15
2.2.1.	Cambio de Aceite.....	16
2.2.2.	Limpieza del Filtro.....	16
2.2.3.	Limpieza de bujía.....	17
2.2.4.	Adaptación de un tubo para gases de escape	17
2.3.	Implementación del sistema de medición de potencia.....	18
2.4.	Conversión del motor a gas natural vehicular (GNV)	19
2.4.1.	Cilindro de Almacenamiento	20
2.4.2.	Tubería de Alta Presión.....	21
2.4.3.	Electroválvula De Gasolina.....	21
2.4.4.	Regulador de Presión	22
2.5.	Mecanismo para el suministro de Oxígeno.....	23
2.6.	Analizador de Gases.....	25
2.7.	Realización De Las Pruebas Experimentales	27
2.8.	Análisis estadístico de los resultados	28
2.8.1.	Criterios del Análisis.....	30
3.	Resultados y discusión.....	31
3.1.	Resultados obtenidos durante las pruebas.....	31
3.2.	Análisis de los resultados	32
3.2.1.	Análisis para la potencia	33
3.2.2.	Análisis para las emisiones de monóxido de carbono (CO)	35
3.2.3.	Análisis para las emisiones de dióxido de carbono CO ₂	38
3.2.4.	Análisis para las emisiones de oxígeno O ₂	40
3.2.5.	Análisis para las emisiones de hidrocarburos sin quemar HC	42
3.3.	Determinación del nivel óptimo de Oxígeno suministrado.....	45
3.4.	Verificación de los supuestos del modelo.....	48
	CONCLUSIONES	50

RECOMENDACIONES	53
Bibliografía	54

ANEXOS

Anexo 1. Marco legal.....	56
Anexo 2. Componentes de un Kit de conversión.....	59
Anexo 3. Ajustes generales del Generador Eléctrico.....	60
Anexo 4. Kit de conversión empleado	61
Anexo 5. Mecanismo de oxigenación	62
Anexo 6. Realización de las Pruebas	63
Anexo 7. Medias e intervalos para la potencia	64
Anexo 8. Medias e intervalos las emisiones de CO	65
Anexo 9. Medias e intervalos para las emisiones de CO ₂	66
Anexo 10. Medias e intervalos para las emisiones de O ₂	67
Anexo 11. Medias e intervalos para las emisiones de HC	68
Anexo 12. Verificación del modelo para la potencia.....	69
Anexo 13. Verificación del modelo para las emisiones de CO.....	70
Anexo 14. Verificación del modelo para las emisiones de CO ₂	71
Anexo 15. Verificación del modelo para las emisiones de O ₂	72
Anexo 16. Verificación del modelo para las emisiones de HC.....	73

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Poder Calorífico de algunos combustibles comerciales.....	9
Tabla 2. Componentes de un Kit básico de conversión.	13
Tabla 3. Características del cilindro de almacenamiento del GNV	20
Tabla 4. Características de la tubería	22
Tabla 5. Características de la electroválvula.....	22
Tabla 6. Datos Técnicos del regulador TN1 /B SIC	23
Tabla 7. Datos técnicos del Regulador Compacto Oxígeno 0-15 LPM.....	25
Tabla 8. Datos técnicos de pipeta de oxígeno (Tipo E)	25
Tabla 9. Características del analizador.....	26
Tabla 10. Rangos de medición del analizador de gases	27
Tabla 11. Tabla ANOVA para un solo factor	29
Tabla 12. Factores, respuestas y niveles del experimento	30
Tabla 13. Resultados obtenidos con Gasolina.....	31
Tabla 14. Resultados Obtenidos.....	32
Tabla 15. ANOVA para Potencia a GNV	33
Tabla 16. ANOVA para las emisiones de CO	36
Tabla 17. ANOVA para las emisiones de CO ₂	38
Tabla 18. ANOVA para las emisiones de O ₂	40
Tabla 19. ANOVA para las emisiones de HC	42
Tabla 20. Resultados promedios para cada variación de Oxígeno.....	45
Tabla 21. Cumplimiento de las Normas de Emisiones Vigentes	46
Tabla 22. Restricciones para la optimización	47

Tabla 23. Solución para los niveles estudiados.....	47
Tabla 24. Resumen de la verificación de los supuestos del modelo	49
Tabla 25. Medias para Potencia por Oxígeno	64
Tabla 26. Medias para Emisiones CO por Oxígeno.....	65
Tabla 27. Medias para Emisiones CO ₂ por Oxígeno	66
Tabla 28. Medias para Emisiones O ₂ por Oxígeno	67
Tabla 29. Medias para Emisiones HC por Oxígeno.....	68

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Componentes básicos de un MCI	5
Figura 2. Tiempos de un ciclo Otto.....	6
Figura 3. Generador Bauker GG2800	15
Figura 4. Banco de resistencias	18
Figura 5. Cilindro de almacenamiento de GNV.....	20
Figura 6. Válvula de Cierre.....	21
Figura 7. Regulador 3 Etapas	23
Figura 8. Cilindro de suministro de oxígeno.....	24
Figura 9. Regulador Compacto Oxígeno 0-15 LPM.....	25
Figura 10. Analizador de gases Brain Bee AGS 688	26
Figura 11. Pinza Amperimétrica Referencia DT-266	28
Figura 12. Componentes de un Kit de conversión	59
Figura 13. Ajustes previos	60
Figura 14. Kit de conversión empleado	61
Figura 15. Mecanismo de oxigenación	62
Figura 16. Realización de las pruebas.....	63

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Gráfico ANOM para la potencia (con 95 % Límites de decisión).....	34
Gráfica 2. Potencia GNV, GNV Oxigenado y Gasolina.....	35
Gráfica 3. ANOM para las emisiones de CO (con 95 % Límites de decisión).....	36
Gráfica 4. Emisiones CO: GNV, GNV Oxigenado y Gasolina	37
Gráfica 5. ANOM para las emisiones de CO ₂ (con 95 % Límites de decisión)	39
Gráfica 6. Emisiones CO ₂ : GNV, GNV Oxigenado y Gasolina	39
Gráfica 7. ANOM para las emisiones de O ₂ (con 95 % Límites de decisión)	41
Gráfica 8. Emisiones O ₂ : GNV, GNV Oxigenado y Gasolina.....	41
Gráfica 9. ANOM para las emisiones de HC (con 95 % Límites de decisión).....	43
Gráfica 10. Emisiones HC: GNV, GNV Oxigenado y Gasolina	44
Gráfica 11. Deseabilidad de los Resultados	46
Gráfica 12. Medias con 95 % LSD de Fisher	64
Gráfica 13. Medias con 95 % LSD de Fisher	65
Gráfica 14. Medias con 95 % LSD de Fisher	66
Gráfica 15. Medias con 95 % LSD de Fisher	67
Gráfica 16. Medias con 95 % LSD de Fisher	68
Gráfica 17. Verificación de los datos de Potencia	69
Gráfica 18. Verificación de los datos de CO	70
Gráfica 19. Verificación de los datos de CO ₂	71
Gráfica 20. Verificación de los datos de O ₂	72
Gráfica 21. Verificación de los datos de HC	73

RESUMEN

El presente trabajo de grado, fue llevado a cabo con el fin de evaluar el efecto que tiene la oxigenación de la mezcla aire combustible, en la potencia y las emisiones de un motor ciclo Otto, convertido a gas natural vehicular (GNV). Para el estudio, se convirtió un motor mono cilíndrico con un volumen de desplazamiento de 163 CC, el cual, se encuentra acoplado a un generador eléctrico de la marca Bauker es GG2800.

Para convertir el motor a un sistema de alimentación bicomcombustible Gasolina-GNV, se empleó un kit de conversión especial, compuesto por un regulador de presión de tres etapas, un cilindro de almacenamiento, tubería de alta presión y una electroválvula de gasolina; estos elementos permitieron el uso del motor con gasolina o con GNV de manera independiente, siendo esto la característica fundamental de los motores bicomcombustibles.

En relación a la oxigenación, se usó un cilindro y un regulador de caudal, para controlar el flujo de oxígeno adicional suministrado en la admisión de aire del motor, con el fin de establecer la potencia y las emisiones obtenidas en cada variación de oxígeno proporcionada al motor. La potencia se midió de manera indirecta, a través de un banco de resistencias eléctricas, que consumían la corriente entregada por el generador.

Para medir las emisiones producidas por el motor, se empleó un analizador de gases de la marca Brain Bee AGS 688, perteneciente al Taller de Conversión Centro Gas, ubicado en la ciudad de Montería.

En el estudio se encontró que después de la conversión, el motor experimenta una pérdida de potencia alrededor del 53 % cuando es accionado con GNV, sin embargo, a través de la oxigenación la potencia del motor cuando usa gas natural, puede ser aumentada hasta un 10 %. En lo relacionado con las emisiones, al utilizar GNV se encuentra una reducción del 79 y 13 %, para el CO y los HC respectivamente, evidenciando los efectos menos nocivos que causa al ambiente, el GNV en comparación a la gasolina. El incremento de potencia pudo obtenerse, a partir de un flujo de oxígeno adicional de 4 LPM, produciendo emisiones que cumplen con la normatividad vigente y por debajo a las generadas con gasolina (79 CO y 17 % HC por debajo).

Palabras claves: Oxigenación, Emisiones, Conversión a GNV, Potencia, Motor, Generador eléctrico, GNV.

ABSTRACT

The present degree work, was carried out with purpose to evaluate the effect that has the oxygenation of the mixture air-fuel, in the power and emissions of an engine with spark ignition, converted to vehicle natural gas (CNG). For the study, was converted a single-cylindrical engine with a displacement volume of 163 CC, which was coupled to an electric generator of the Bauker brand GG2800.

To convert the engine to a gasoline-CNG bi-fuel power system, a special conversion kit was used, consisting of a three-stage pressure regulator, a storage cylinder, high pressure piping and a gasoline solenoid valve; These elements allowed the use of the engine with gasoline or with CNG independently, being this the fundamental characteristic of the bi-combustibles engines.

In relation to oxygenation, a cylinder and a flow regulator were used to control the additional oxygen flow supplied in the engine air intake, with purpose to establish the power and emissions obtained in each variation of oxygen provided to the motor. The power was measured indirectly, through a bank electrical resistances, that consumed the current delivered by the generator.

To measure the emissions produced by the engine, a gas analyzer was used of the brand Brain Bee AGS 688, belonging to the Conversion Workshop, Centro Gas, located in the city of Montería.

In the study was found that after the conversion, the engine experiences a power loss around 53% when it is powered by CNG, however through oxygenation, the engine power when using natural gas can increased up to a 10%. Regarding emissions, using CNG produces a reduction of 79 and 13%, for CO and HC respectively, showing the less harmful effects to the environment, that has the CNG compared to gasoline. The increase in power could be obtained from an additional oxygen flow of 4 LPM, producing emissions that comply with current regulations and below those generated with gasoline (under, 79 CO and 17% HC).

Key Words: Oxygenation, Emissions, Conversion to NGV, Power, Motor, Generator, CNG.

INTRODUCCIÓN

Las necesidades energéticas en la actualidad requieren el uso de combustibles alternativos sustentables desde el aspecto económico, técnico y especialmente ambiental, que permitan la sustitución total o parcial de los combustibles líquidos. Por ello durante los últimos años se vienen haciendo investigaciones que contribuyan a afianzar la implementación y mejorar la percepción de combustibles gaseosos como el GNV, el cual es una buena opción para remplazar los combustibles líquidos debido a que genera durante su combustión, menos emisiones de gases contaminantes, no emite partículas sólidas, es económico, eficiente y presenta un menor consumo en los motores.

Pero no todo es bueno, pues el gas natural posee una limitación que afecta su implementación masiva, y ésta es, la pérdida de potencia a la que se inducen los automotores con el proceso de conversión; por lo tanto, el presente trabajo trata de cómo se ven afectadas las prestaciones del motor ciclo Otto de un generador eléctrico convertido a gas natural, en el cual, la mezcla aire-combustible (GNV) ha sido enriquecida con oxígeno. El enriquecimiento se realiza por medio del suministro de oxígeno, directamente en la admisión de aire del motor, con el fin, de incrementar las concentraciones de dicho gas (O_2) en la cámara de combustión.

Para oxigenar el motor, se emplea un mecanismo de suministro de oxígeno adicional en la admisión de aire, lo que provoca, una mejora en la potencia entregada por el motor cuando es accionado con GNV. Además, con la oxigenación ciertas emisiones permanecen por debajo, en comparación a las generadas por el motor cuando usa gasolina, y a las permitidas por la normatividad vigente en Colombia.

Para desarrollar el proyecto, lo primero que se hizo fue indagar sobre la oxigenación y cómo afecta las prestaciones de un motor, luego se procede a buscar la manera de cómo se ingresaría el oxígeno a la cámara de admisión, considerando que el mecanismo que se emplearía permitiera su ingreso de forma simple, y a la vez facilitara regular la entrada de éste a la cámara. Definido ese aspecto se procede a realizar la conversión a gas natural del motor, la cual, se llevó a cabo en un taller especializado de la ciudad de Montería.

Con lo anterior culminado y puesto a punta, se realizaron las respectivas pruebas, en las cuales, se tuvo el control total por medio de un regulador de la cantidad de oxígeno ingresada a la cámara de admisión. Luego, se obtuvo la potencia entregada por el generador eléctrico de manera indirecta, a través de la medición de la intensidad de corriente sobre un banco de resistencias eléctricas, para cada caudal de oxígeno suministrado, y seguidamente se tomaron los resultados del análisis de emisión de gases.

OBJETIVOS

Objetivo General

Evaluar el efecto causado por la oxigenación de la mezcla aire-combustible en las prestaciones de un motor ciclo Otto convertido a gas natural.

Objetivos Específicos y Cuadro Metodológico

1. Medir las prestaciones del motor de ciclo Otto con gasolina colombiana y GNV en las condiciones ambientales de la ciudad de montería.
1.1. Identificar y seleccionar los elementos necesarios para realizar la conversión a GNV en primera o segunda generación para así implementarla en la planta eléctrica. Con el fin de medir, por medio del banco eléctrico la potencia y así obtener el torque, teniendo en cuenta emisiones.
2. Determinar las prestaciones del motor de ciclo Otto para las diferentes variaciones aire-oxígeno admitidas con GNV.
2.1. Se determinarán los posibles % de oxígeno permisibles en el MCI con el fin de evitar el sobrecalentamiento del motor y afectar el correcto funcionamiento de este. Se adaptará al sistema de admisión de aire del motor un mecanismo de oxigenación que permita el ingreso del oxígeno en las concentraciones establecidas con el fin de enriquecer el aire admitido y medir las prestaciones mencionadas anteriormente.
3. Cuantificar los niveles de emisiones en los gases de escape con gasolina, y GNV para cada variación aire-oxígeno admitida.
3.1. La medición de la emisión de gases, será evaluada con una sonda, la cual, determinará para las proporciones de oxígeno admitidas la más óptima ambientalmente según los (HC) hidrocarburos sin quemar producto de combustiones incompletas, monóxido de carbono, dióxido de carbono, en las diferentes concentraciones que arrojen los gases de escape con gasolina y para cada una de los porcentajes de oxigenación en la mezcla con GNV.

1. Revisión de Literatura

1.1. Motores de Combustión Interna

Un motor de combustión interna (MCI) es una máquina térmica que convierte la energía química que posee un combustible a energía mecánica, generalmente a través de la rotación de un eje de salida. La energía química del combustible primero se convierte en energía térmica mediante combustión u oxidación en presencia de aire al interior del motor (Pulkrabek, 1997).

Generalmente los MCI son empleados en la propulsión de vehículos como automóviles, camiones, locomotoras, buques o aviones, y también en otras aplicaciones que emplean motores estacionarios para impulsar generadores o bombas, así como motores portátiles para sierras de cadena (motosierras) y cortadoras de césped.

1.1.1. Clasificación

Los MCI pueden ser clasificados de diferentes maneras, a continuación, se mencionan algunas:

Tipo de ignición: por chispa y por compresión.

Ciclo del motor: Cuatro Tiempos (4T) y Dos tiempos (2T).

Diseño básico: Alternativo y Rotativo.

Localización de las válvulas: Válvulas en la cabeza OHV y Válvulas en el bloque.

Disposición y numero de cilindros: Monocilíndricos, Cilindros en Línea, V y W.

Entrada de aire: Aspiración natural y Sobrealimentados.

1.1.2. Componentes básicos de MCI

Los MCI también se conocen como motores de desplazamiento positivo o volumétrico, en los que el trabajo se obtiene por medio de un mecanismo biela-manivela, que convierte el desplazamiento lineal del émbolo (pistón) en rotación.

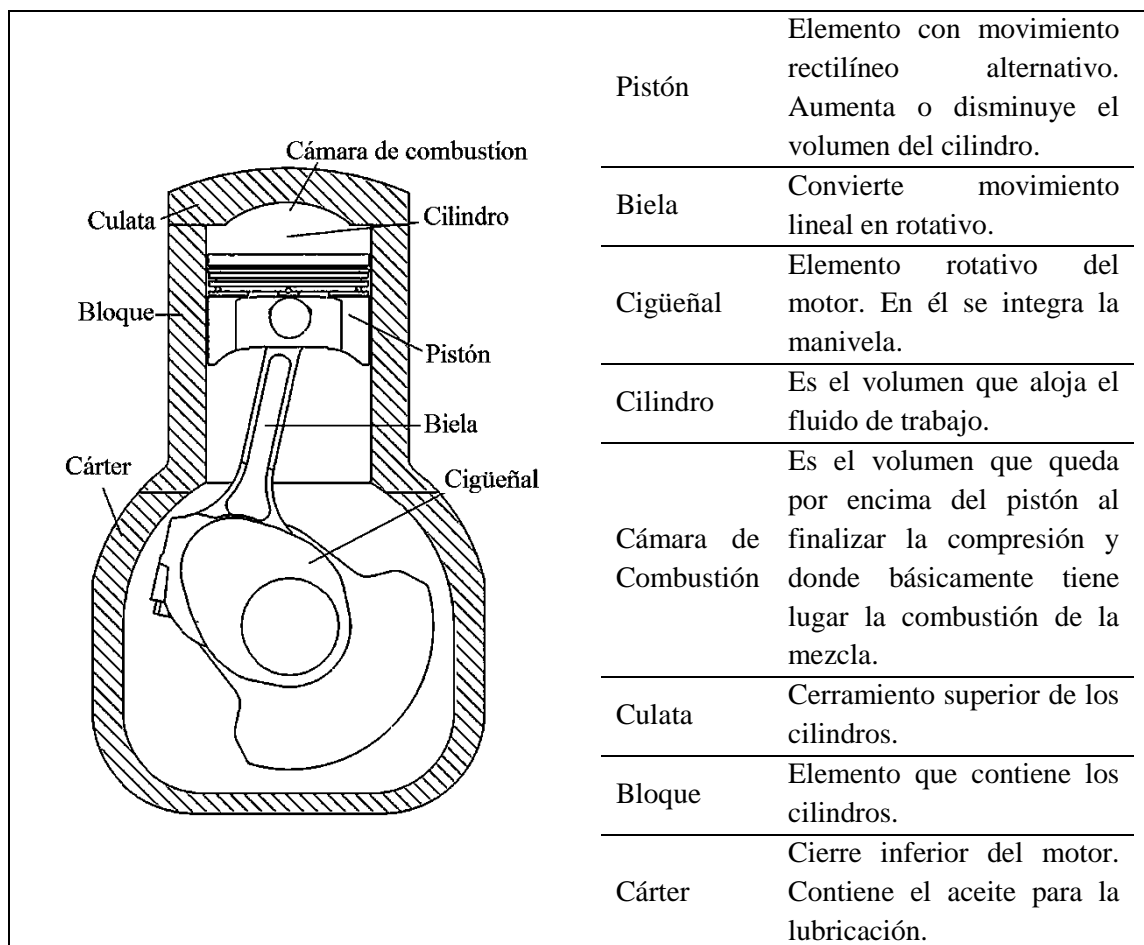


Figura 1. Componentes básicos de un MCI

Fuente: Rovira & Muñoz (2015)- *Motores de Combustión Interna*

1.2. Ciclo termodinámico en un motor de combustión

Para convertir la energía química presente en un combustible a energía mecánica, los MCI en su interior realizan un conjunto de transformaciones termodinámicas sobre un fluido de trabajo, las cuales deben repetirse en un orden consecutivo para el funcionamiento continuo del motor. Las transformaciones efectuadas sobre el fluido de trabajo conforman lo que se denomina un ciclo termodinámico, en el que el estado inicial coincide con el estado final del sistema (Martí Perera, 1997).

1.2.1. Ciclo Otto

Es un ciclo donde el pistón ejecuta cuatro tiempos o carreras al interior del cilindro y en las que el cigüeñal completa dos revoluciones. Lo comprenden los procesos básicos de admisión, compresión, combustión, expansión y escape. En los procesos de admisión y escape el motor intercambia masa con el exterior, mientras que los procesos de compresión, combustión y expansión no hay dicho intercambio (Cengel & Boles, 2009).

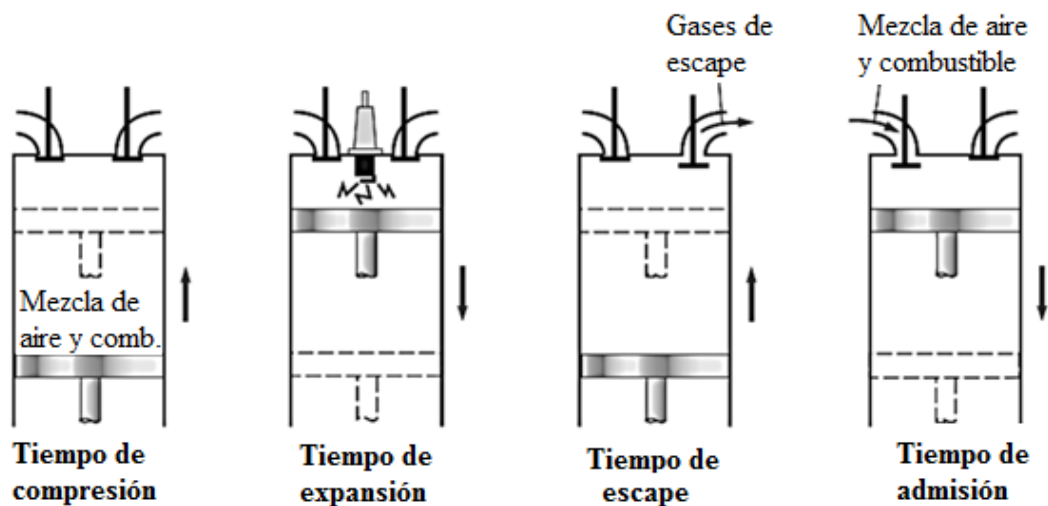


Figura 2. Tiempos de un ciclo Otto

Fuente: Çengel & Boles (2009) – Termodinámica

En la Figura 2 se muestran los cuatro tiempos de un MCI ciclo Otto. En el **tiempo de compresión**, mientras las válvulas de admisión y escape se encuentran cerradas, el émbolo asciende desde el punto muerto inferior del cilindro, comprimiendo la mezcla aire-combustible introducida durante el proceso de admisión.

Una vez comprimida la mezcla por el pistón y antes de llegar al punto muerto superior, una chispa inicia la combustión, lo que aumenta la temperatura y presión del sistema. Los gases de combustión inician el **tiempo de expansión**, generando el impulso hacia abajo del pistón, que transmite giro al cigüeñal y produce la potencia de salida.

Después de llegar al punto muerto inferior la válvula de escape se abre y el pistón asciende nuevamente para evacuar los gases, con lo que se completa el **tiempo de escape**. Una vez liberados los gases, cerrada la válvula de escape y abierta la válvula de admisión, el émbolo desciende generando una depresión en el cilindro que permite la admisión de masa fresca de aire-combustible; este proceso que se conoce como **tiempo de admisión**.

1.3. Combustibles

La energía química transformada en energía mecánica al interior de un MCI proviene de sustancias que se conocen genéricamente como combustibles. Estas sustancias reaccionan con el oxígeno (combustión), liberando la energía contenida en la estructura molecular de los compuestos que forman el combustible. En condiciones normales de presión y temperatura pueden clasificarse, independientemente de su procedencia, en combustibles sólidos, líquidos y gaseosos (Álvarez F., et al., 2005). Los combustibles sólidos no tienen aplicabilidad en los MCI.

1.3.1. Combustibles líquidos derivados del petróleo

La mayoría de los combustibles líquidos provienen de la destilación del petróleo y se componen principalmente de hidrogeno y carbono, y tienen la formula general C_nH_m . Entre ellos se encuentran el combustóleo, el queroseno, el diésel y la gasolina, ésta última, es el combustible líquido más volátil a condiciones ambientales y se emplea en los MCI.

La gasolina por su demanda y especificaciones técnicas, requiere ser mezclada con varios productos del proceso de refinado, pues la obtenida en la destilación primaria del crudo no cubre las necesidades actuales y tiene bajo octanaje. Algunos de los componentes de la gasolina son el propano, butano, pentano, benceno, hexano, entre otros, pero en su fórmula general se considera como octano C_8H_{18} (Cengel & Boles, 2009).

1.3.2. Combustibles gaseosos

Son por lo general combustibles fósiles o subproductos derivados de estos. Son mezclas de varios gases por lo que su composición es muy variada y se representa por fracciones molares o por volumen. Son combustibles de este tipo, el gas licuado de petróleo (GLP), gas de agua, gas de gasógeno, gas de alto horno y el gas natural, éste último es usado en algunos MCI.

El gas natural es una mezcla compuesta entre un 90 % y 98 %, dependiendo del yacimiento, por metano (CH_4). Aunque minoritariamente, también contiene etano, propano, butano e, incluso, hidrocarburos más pesados. Para el uso en MCI el gas natural se comprime a presiones que oscilan entre 15,20 y 25,33 MPa y se denomina gas natural comprimido vehicular GNV (Cengel & Boles, 2009).

1.3.3. Poder calorífico

Propiedad que mide la cantidad de energía liberada por un combustible al quemarse completamente, y depende del contenido de hidrógeno y carbono. El poder calorífico superior es la cantidad que se obtiene al quemar un kilogramo de combustible, teniendo en cuenta el calor cedido por enfriamiento, hasta la condensación del vapor de agua en los productos de combustión (Álvarez F., et al., 2005).

El poder calorífico inferior es la cantidad de calor liberado en la combustión completa de un kilogramo de combustible, sin que se condense el vapor de agua en los productos de la combustión. Como los gases de combustión en los MCI tienen una temperatura mayor que la temperatura ambiente, no se considera la condensación del vapor de agua, por lo que solo se tiene en cuenta el poder calorífico inferior. En la Tabla 1 se proporciona el poder calorífico de algunos combustibles.

Tabla 1. Poder Calorífico de algunos combustibles comerciales

Fuente: UPME, Calculadora de emisiones Fecoc (2016)

Combustible	Poder Calorífico	Unidades
Gasolina comercial E10	40.659,33	kJ/kg
Alcohol carburante	22.480,20	kJ/kg
Diésel comercial B	44.149,66	kJ/kg
Biodiesel	37.907,85	kJ/kg
GNV	35,65	MJ/m ³

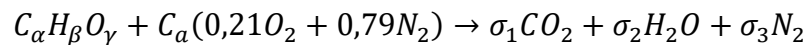
1.4. Combustión y emisiones

La combustión es una reacción química de oxidación muy rápida acompañada de un flujo de calor exotérmico. Hay una serie de sustancias que desaparecen, los reactivos, y sustancias que aparecen, los productos. En el proceso de oxidación se produce la ruptura

de enlaces químicos y se forman otros nuevos, distintos de los iniciales. Durante la ruptura y formación de enlaces es que se produce la liberación de energía térmica (Sánchez, 2007).

1.4.1. Estequiometría en reacciones de combustión

Los productos de una reacción de combustión son el CO_2 , H_2O y N_2 , cuando se considera un combustible de composición general $\text{C}_\alpha\text{H}_\beta\text{O}_\gamma$, que reacciona con el oxígeno del aire bajo condiciones estequiométricas. Suponiendo que el aire tiene una composición volumétrica de 21 % en oxígeno y 79 % en nitrógeno, despreciando el argón y el vapor de agua por simplicidad (Sánchez, 2007).



Balanceando la ecuación se puede obtener V_a , σ_1 , σ_2 y σ_3 en función α , β , y γ .

Carbono	$\alpha = \sigma_1$		$\sigma_1 = \alpha$
Hidrogeno	$\beta = 2\sigma_2$		$\sigma_2 = \beta/2$
Oxígeno	$\gamma + 2(0,21)\text{C}_a = 2\sigma_1 + \sigma_2$	→	$\sigma_3 = 0,79(4\alpha + \beta - 2\gamma)/4(0,21)$
Nitrógeno	$2(0,79)\text{C}_a = 2\sigma_3$		$\text{C}_a = (4\alpha + \beta - 2\gamma)/4(0,21)$

1.4.1.1. Relación aire-combustible

La relación (AF) entre la masa de aire (m_a) estequiométrica, demandada para completar una reacción de combustión, por una determinada masa de combustible (m_f).

$$AF = m_a/m_f$$

En ocasiones la combustión se puede llevar a cabo con proporciones de aire que superan la cantidad estequiométrica, por lo que se define una relación aire combustible relativa, donde se compara la relación actual con la estequiométrica (Stone & Ball, 2004).

$$\lambda = AF_a/AF_e$$

La relación aire-combustible relativa permite determinar si la combustión se realiza con exceso o falta de aire. Una mezcla pobre ($\lambda > 1$) indica que el MCI trabaja con un exceso de aire o falta de combustible, mientras que una mezcla rica ($\lambda < 1$) indica un exceso de combustible o falta de aire en la combustión, y se determina así:

$$\% EXA = (\lambda - 1) \times 100\%$$

1.4.2. Emisiones

Forman el conjunto de fuentes contaminantes asociadas los MCI, ya sean de naturaleza acústica, residuos por la ejecución de mantenimientos o por el vertimiento de agentes contaminantes al aire, a través de los gases de escape. Las emisiones afectan al ambiente, así como a la salud humana, generan alteración de las propiedades de la atmosfera, daño a la vegetación, afecciones respiratorias, lluvias acidas, entre otras. Algunos de los principales contaminantes emitidos por los MCI son (Sánchez, 2007), los hidrocarburos sin quemar (HC), las partículas suspendidas, los óxidos nitrosos (NO_x), el monóxido y el dióxido de carbono (CO y CO₂).

1.4.2.1. Hidrocarburos sin quemar (HC)

Son compuestos orgánicos en estado gaseosos, formados por la falta de combustión o quema deficiente del combustible usado por el motor.

1.4.2.2. Óxidos Nitrosos (NO_x)

Estas emisiones las componen los óxidos nitrosos y nítricos (NO y NO₂), que se producen debido a la alta temperatura del frente de llama y que, por cinética química, no llegan a reducirse.

1.4.2.3. Monóxido carbono (CO)

Es un gas incoloro e inodoro, inherente a cualquier proceso de combustión, ya que es una especie intermedia que aparece debido a la cinética química de la combustión. Es tóxico para la salud humana, porque inhibe la absorción de oxígeno por los glóbulos rojos.

1.4.2.4. Dióxido de carbono (CO₂)

El dióxido de carbono es un gas inocuo para la salud humana, forma parte de la composición de la atmósfera y de los ciclos vitales de la naturaleza. Su concentración ha sido incrementada por las actividades humanas. Una de las fuentes principales de las emisiones de CO₂, son los MCI que usan combustibles fósiles y su principal efecto es el incremento del efecto invernadero.

1.5. Uso del gas natural en motores

Existen diversas tecnologías disponibles para el uso de GNV como combustible en los MCI. Los motores dedicados, los duales y los bicomcombustibles son ejemplos específicos que pueden operar con GNV, los primeros, son diseñados por el fabricante para el uso exclusivo de un combustible, el cual puede ser GNV, gasolina o diésel. Por su parte, los motores duales pueden trabajar con dos combustibles simultáneamente, y se emplean para hacer combustión de GNV en motores de encendido por compresión, que han sido equipados con un kit de conversión.

1.5.1. Motores bicomcombustibles

Son motores a los que se instala un sistema de suministro de combustible adicional, que les permite operar con dos combustibles de manera independiente. Generalmente se adaptan a partir de motores ciclo Otto y pueden funcionar con gasolina, gas natural o

cualquier otro combustible de encendido por chispa como el etanol (UPME, 2014). Para que el motor llegue a funcionar con un combustible diferente, se necesita instalar un sistema de inyección alternativo, el cual es denominado kit de conversión. Los sistemas de conversión bicomcombustible dependen del tipo de sistema de inyección de combustible con que cuente el motor en su forma dedicada.

1.5.2. Kit de conversión

Son un conjunto de accesorios que permiten la utilización del gas natural como combustible, permitiendo su ingreso al motor, para que éste funcione bajo condiciones similares a las que trabaja, cuando emplea el combustible para el cual fue diseñado. Un kit básico de conversión está compuesto por los elementos que se enuncian en la Tabla 2.

Tabla 2. Componentes de un Kit básico de conversión.

Fuente: Conversiones GNV La Isla (2012)

Componente	Descripción
1. Llave conmutadora	Permite seleccionar el tipo de combustible a utilizar.
2. Válvula de llenado	Permite llenar el cilindro de gas.
3. Regulador de presión	Reduce la presión almacenada en los cilindros en tres etapas. De 3.000 a 65 psi, de 65 a 3 psi y 3 psi a 0.5 pulgadas de agua.
4. Manómetro	Indica la presión, por lo tanto, el estado de carga del estanque.
5. Mezclador	Proveen al motor de una mezcla de aire y gas.
6. Cilindro de GNV	Son fabricados en acero sin costura con un espesor de pared de 9 milímetros, resisten una presión de trabajo de 3.000 PSI.
7. Válvula para el cilindro	Permite la entrada y salida de gas de los cilindros.
8. Variador electrónico de avance	Cuando el motor opera con GNV permite adelantar la chispa.
9. Electroválvula de gasolina	Impide el paso de gasolina al carburador cuando el motor opera con GNV.
10. Tubería de alta presión	Es construida en acero al carbón o inoxidable, forrada en PVC o con pintura horneada; su presión de trabajo es de 3.000 PSI.

1.5.3. Tecnologías disponibles para la conversión

La conversión a GNV, depende de la tecnología de inyección y control del consumo de combustible, con que cuente el motor receptor del kit de conversión (Gases de Occidente, 2017). Entre ellas se encuentran:

1.5.3.1. Lazo abierto

También se denomina tecnología de primera y segunda generación. Es una tecnología sin control de consumo de combustible, sistema mecánico y de calibración manual, abarca los vehículos con carburador o inyección que no poseen sensor de oxígeno.

1.5.3.2. Lazo cerrado

Se denomina tecnología de tercera generación y se diferencia de la tecnología de lazo abierto, porque el suministro de combustible es controlado por una central electrónica y un motor paso a paso, que toma como referencia la lectura del sensor de oxígeno, para regular la cantidad de gas natural en la mezcla. Abarca únicamente motores inyectados con sensor de oxígeno.

1.5.3.3. Tecnología de inyección secuencial

También se conoce como tecnología de quinta generación y abarca solo motores con inyección multipunto. El funcionamiento es controlado por una computadora que genera las señales de inyección y por otra computadora propia del equipo de gas, se interpretan para comandar la inyección del GNV. Este sistema es el que utilizan las fábricas automotrices para sus vehículos dedicados a gas. La tendencia es la aplicación de esta tecnología en vehículos a partir de modelos 2008 (Gases de Occidente, 2017).

2. Materiales y Métodos

2.1. Motor empleado para el desarrollo del Proyecto

Para llevar a cabo el proyecto se empleó un generador a gasolina Bauker GG2800 que posee un motor de ciclo OTTO, el cual tiene como características técnicas 163 cc de desplazamiento en el cilindro y una potencia máxima de 5,5 hp a 3600 rpm, según norma SAE J1995; adaptado a un generador eléctrico. Esta planta eléctrica entrega una potencia máxima de 2200 W y nominalmente trabaja con un voltaje de 110 V (Ver Figura 3).



***Figura 3.** Generador Bauker GG2800*

***Fuente:** Manual del usuario Bauker GG2800 (2017)*

2.2. Ajustes generales de la planta eléctrica

Como primer paso se hizo una revisión concerniente al estado de los elementos que

conforman la planta en el Laboratorio de Materiales y Procesos de la Universidad de Córdoba, lo cual mostraba que se debían hacer ciertos ajustes para que esta estuviera en óptimas condiciones para las pruebas. Por lo tanto, se hizo un cambio de aceite, limpieza del filtro, revisión de la bujía, instalación de escape.

2.2.1. Cambio de Aceite

La planta utiliza por catálogo aceite SAE 30, el cual se cambió, porque se había empleado anteriormente a la realización experimental de la investigación unas 20 horas y siguiendo las instrucciones del manual de la planta lo más recomendable es realizar un cambio de este cuando el equipo se ha utilizado durante ese lapso de tiempo; lo cual además permitía realizar la parte experimental del proyecto con el aceite en condiciones idóneas. Se usó aceite SAE 10W-30 de la línea Havoline de Chevron para el cambio, pues cumple con los requerimientos de la planta y además es un aceite con características que ofrece una mejor combustión a la hora de trabajar en frío con el equipo, hecho que justifica el cambio por aceite multigrado.

Al desalojar todo el aceite viejo, se ingresó una mínima cantidad de aceite nuevo y se puso a funcionar el motor, para hacer una limpieza del mismo, con el fin así eliminar cualquier impureza que pudiera haber quedado en el motor; este procedimiento se llevó a cabo un par de veces para garantizar la mayor limpieza posible del motor.

2.2.2. Limpieza del Filtro

En lo relacionado con la lubricación de la planta, primeramente, se procedió al lavado del filtro de aire de la planta, esto se lleva a cabo teniendo en cuenta las

indicaciones del manual del fabricante para estos casos, así que se hizo el desmontaje del filtro de la planta y luego se procedió a lavar la esponja con detergente común y agua. Seguidamente a su limpieza, enjuague y secado se añaden 10 ml de aceite SAE 10W-30, igual al utilizado por la planta con el fin de lubricar el filtro y atrapar partículas suspendidas en el aire (Buelvas A. & Lopez A., 2016)

2.2.3. Limpieza de bujía

En lo correspondiente a la bujía se llevó a cabo una limpieza siguiendo los pasos indicados en el manual del fabricante, el cual expresa que se debe iniciar sacando la tapa de la bujía, desmontar la bujía, luego quitar los residuos de la combustión limpiando la parte superior de la bujía con alcohol y después con aire a presión eliminar los residuos de la superficie, por último, medir la distancia de los electrodos, reinstalar la bujía y colocar la tapa a presión.

2.2.4. Adaptación de un tubo para gases de escape

La planta posee un silenciador en el escape con una longitud y un diámetro externo de 2,5 cm, mientras que la sonda para medición de gases tiene una longitud ajustable, obligando a que el escape del motor, deba tener una extensión mínima para realizar pruebas de gases. Por lo anterior, se necesita alargar la longitud del escape para que la sonda quede totalmente inmersa durante el análisis, y así garantizar que el aire atmosférico no interactúe en el proceso, pues esto, alteraría los resultados del analizador.

Con el fin de tener la longitud requerida se empleó un tubo de cobre con un diámetro interno de 2,54 cm (1 pulgada). Este tubo fue ranurado 2,5 cm longitudinalmente, de tal

modo que pudiera cerrarse compactamente y así ejercer presión en el escape de la planta, además fue asegurado con una abrazadera metálica y sellado con sellante para motor resistente a altas temperaturas y con el fin de evitar filtraciones o escapes durante el análisis (Buelvas A. & Lopez A., 2016).

2.3. Implementación del sistema de medición de potencia

El generador eléctrico a gasolina entrega una potencia máxima de 2.200 W por lo que se emplea un mecanismo, que consuma al menos un 80 % de la potencia nominal de la planta. Para llevar a cabo el proyecto, en lo concerniente a la medición de potencia, se emplea una configuración de resistencias desarrolladas por Buelvas y López (2016), en el proyecto “Evaluación técnico-económica de mezclas etanol - gasolina en un motor de Ciclo Otto” llevado a cabo en la Universidad de Córdoba.



Figura 4. Banco de resistencias

Fuente: Autores (2017). Registro fotográfico

El sistema de medición de potencia (Figura 4), cuenta con un par resistencias eléctricas, cada una con capacidad máxima de 1.100 W a 120 V, similares a las empleadas en estufas eléctricas, las cuales, poseen la capacidad de transformar rápidamente energía

eléctrica en calor. El banco de resistencias eléctricas, brinda la posibilidad de utilizar un gran amperaje en cortos periodos de tiempo, exigiendo así la entrega de potencia por parte del motor.

La configuración de resistencias permite regular a voluntad (alto, medio y bajo) la intensidad de la corriente en el circuito; aunque para el proyecto se trabajó con el regulador del banco de resistencias en nivel alto, para llevar el motor a plena carga, de forma que los resultados experimentales que se obtuvieran, fueran con el motor al máximo nivel de salida de potencia, tanto con gasolina como con GNV.

La planta cuenta con dos tomas de corriente alterna y una de corriente directa, se hizo uso entonces de las tomas de corriente alterna. De acuerdo con el catálogo, la planta posee un mecanismo de seguridad que le permite trabajar máximo a 21,8 A de corriente, por lo que al tener dos conexiones el parámetro de diseño para cada conector del banco de resistencias fue 10,9 A.

2.4. Conversión del motor a gas natural vehicular (GNV)

La conversión a gas de la planta eléctrica tuvo lugar en un taller especializado en este tipo de conversiones en la ciudad de Montería y se determinó que se haría de forma convencional (1era generación) pues el motor de la planta utilizada para el proyecto, es alimentada por carburador.

Lo primero que se hizo fue realizar un diagnóstico especializado de cada uno de los sistemas principales del motor previo a la conversión (refrigeración, lubricación, y estado

mecánico del motor) para un buen desempeño con GNV. Luego se procedió a instalar un kit de conversión sencillo que incluye: un cilindro de almacenamiento, un regulador de presión, una electroválvula, y la tubería en general.

2.4.1. Cilindro de Almacenamiento

Es un recipiente estrictamente diseñado para el almacenaje y aprovisionamiento de GNV, fabricado con materiales altamente resistentes y con características particulares de diseño. El cilindro empleado en el proyecto posee las siguientes características (Tabla 3):

Tabla 3. Características del cilindro de almacenamiento del GNV

Fuente: Autores (2017)

Diámetro (mm)	Volumen (L)	Longitud (mm)	Peso (Kg)	Presión (MPa)	Equivalencia (L gasolina)
273	30	691	38,2	20	8,6 (2,3 gal)



Figura 5. Cilindro de almacenamiento de GNV

Fuente: Autores (2017). Registro fotográfico

El cilindro empleado en el proyecto (Figura 5), cuenta con una Válvula de cierre VM01 ventilada, la cual tiene las siguientes características técnicas (Figura 6):

	Material: Latón forjado CNC mecanizado
	Peso: 0.65 kg
	Tipo de producto: Válvula manual para GNV con sistema de venteo
	Max. presión de trabajo: 26.0 MPa
	Presión de prueba: 27.5 MPa con disco de ruptura (33.0 MPa sin disco)
	Temperatura de trabajo: -40°C / 85°C
	Sección mínima paso del gas T-PRD: 28.3 mm ²
	Grifo manual, sección mínima de pasaje gas: 12.6 mm ²
	Grifo manual, torque de montaje a: 26 MPa: 3 ± 0.5 Nm
	Grifo manual, ángulo de rotación: 900° (±45°)
	Válvula de exceso de flujo - ΔP de activación: 0.65 MPa
	Conexión de tubería: M12x1 (upon request 1/4" NPT and 1/8" NPT)
	Rosca cilindro: DIN, BS, NGT

Figura 6. Válvula de Cierre

Fuente: Catálogo Tomasetto Achille (2017)

2.4.2. Tubería de Alta Presión

Para transportar el GNV del cilindro al regulador se emplea una tubería de alta presión, la cual, tiene como materia prima tubos de acero sin soldadura, con recubrimiento galvanizado y PVC (Norma: DIN 2391). En la Tabla 4 se pueden detallar sus características.

2.4.3. Electroválvula De Gasolina

Debido a que la planta eléctrica se transformó a bicomcombustible, es decir, fue modificada para trabajar con dos tipos de combustibles de manera independiente, se

necesitó emplear una electroválvula de cierre automático para el circuito de gasolina. Las principales características de la electroválvula de gasolina se observan en la Tabla 5.

Tabla 4. Características de la tubería

Fuente: Sunny Steel Enterprise Ltd. (2017)

Propiedades geométricas	Propiedades mecánicas	Parámetro
OD = 6 mm	Resistencia a la tracción = 310-410 MPa	La presión normal de utilización: 25-35 MPa
Espesor = 1 mm	Fuerza Min Rendimiento = 205 MPa	Presión de rotura: 154 MPa
Longitud = 4000 mm	Elongación mínima de fractura = 28%	Flexión Torsión: ≤ 2 N.m

Tabla 5. Características de la electroválvula

Fuente: B&H Landirenzo, catálogo de electroválvulas (2017)

Tensión y Consumo eléctrico	12 Vcc y 7,5 W
Conexión eléctrica	Dos terminales tipo pala macho.
Conexiones de entrada y salida de gasolina	Racor de 7.5 mm de diámetro exterior para conexión de manguera con ajuste por abrazadera.
Presión máxima de trabajo	0.1 MPa.

2.4.4. Regulador de Presión

Siempre en los de sistemas de GNV se requiere, un regulador de presión; debido a que la presión en el cilindro de almacenamiento disminuirá con el consumo y además la presión con la que sale el GNV del cilindro es demasiado alta (20,68 MPa o 3000 psi) para introducirse directamente al motor.

En consecuencia, para el proyecto se empleó un regulador de 3 etapas (TN1 /B SIC estándar, Figura 7), que es un tipo de regulador donde se realiza toda la reducción de

presión en tres etapas incorporadas en un solo cuerpo (Tomasetto Lovato, 2006). En la Tabla 6 se presentan los datos técnicos del regulador empleado en la conversión.

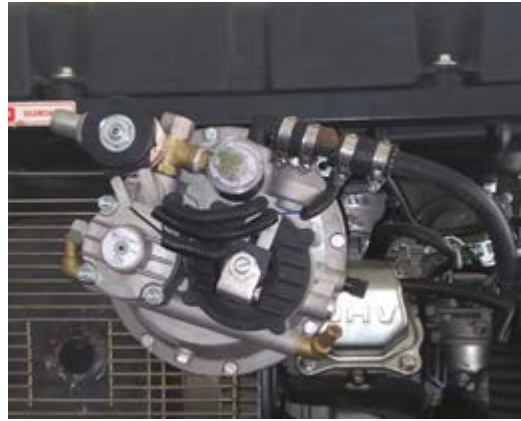


Figura 7. Regulador 3 Etapas

Fuente: Autores (2017). Registro fotográfico

Tabla 6. Datos Técnicos del regulador TN1 /B SIC

Fuente: Landireenzo, catálogo de reguladores (2017)

Tipo de Reductor	3 etapas con dispositivo de partida electrónico y marcha lenta a presión positiva.
Uso	Para los motores a inyección, carburador y turbo.
Tipo de combustible	Gas Natural Vehicular (GNV)
Cuerpo	Aluminio
Presión de prueba	30 MPa (300 bar)
Presión de entrada	22 MPa (220 bar)
Presión de trabajo 1^a etapa	0,35- 0,47 MPa (3,5-4,7 bar)
Presión de trabajo 2^a etapa	0,15 MPa (1,5 bar)
Fuente de alimentación	12 V
Potencia de la bobina de la Electroválvula	De alta presión 20 W y de Marcha lenta 18 W

2.5. Mecanismo para el suministro de Oxígeno

En lo relacionado al diseño y montaje del mecanismo de oxigenación, fue llevado a cabo en el Laboratorio de Materiales y Procesos de la Universidad de Córdoba. El diseño

y montaje del mecanismo fue ideado de tal forma que el ingreso del oxígeno a la cámara de admisión se hiciera de la manera más sencilla y directa posible, buscando facilitar la regulación del oxígeno y la implementación correcta del mecanismo.

Como se expresó anteriormente el mecanismo tenía que ser simple, por lo tanto, se hizo una conexión por medio de una manguera, desde el filtro de aire del motor hasta un regulador de caudal y presión (Figura 9) conectado al cilindro de oxígeno (Figura 8), el cual permitía ingresar la cantidad de oxígeno deseada (2,4,6,8,10 y 15 LMP).



Figura 8. Cilindro de suministro de oxígeno

Fuente: Autores (2017). Registro fotográfico

Los caudales de oxígeno que se ingresaron al motor fueron determinados, teniendo en cuenta las restricciones técnicas que presentaban los instrumentos utilizados para el montaje, en el caso del mecanismo de oxigenación se partió de los caudales que el regulador permitía entregar.



Figura 9. Regulador Compacto Oxígeno 0-15 LPM

Fuente: Sitio web de Mada Inc. catálogo de reguladores (2017)

Tabla 7. Datos técnicos del Regulador Compacto Oxígeno 0-15 LPM

Fuente: Sitio web Import Corporal Medical S.A.S (2017)

Tipo de conexión	CGA870 estándar del mercado con lengüeta (barba) de salida y opera a 50 PSI.
Dimensiones	10.16 cm en la longitud del cuerpo. 317 gr de peso.
Presión de trabajo	3,45-20,68 MPa (500-3000 psi)
El regulador de 0-15 LPM se puede establecer	0, 1/2, 1, 1 1/2, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10 o 15 LPM.
Material de fabricación	Bronce y aluminio

Tabla 8. Datos técnicos de pipeta de oxígeno (Tipo E)

Fuente: Autores (2017)

Concentración de O₂	Mínimo 99%
Olor	Gas libre de olor
Presión	13,80 – 15,86 MPa (2000-2300 psi)
Envase	Cilindro blanco de acero
Válvula	Válvula GGA 870
Volumen	630 L

2.6. Analizador de Gases

Para el análisis de las emisiones, se empleó el analizador de gases Brain Bee AGS 688, éste es uno de los analizadores de gases más completo y versátil del mercado; incluye

una pantalla con display LCD (Figura 10), para mostrar al operador los valores de los gases medidos, así como los datos de RPM y temperatura de aceite del motor (AIS 3D, 2017).



Figura 10. Analizador de gases Brain Bee AGS 688

Fuente: Sitio web Brain Bee (2017)

Tabla 9. Características del analizador

Fuente: Autores (2017)

Características Técnicas del Analizador de Gases AGS-688
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Función automática de calibración a CERO ✓ Tiempo de calentamiento menor a 10 minutos ✓ Sistema de filtrado reforzado y con trampa de agua ✓ Pruebas automáticas para residuos de HC y vacío ✓ Auto prueba y auto diagnóstico ✓ Compensador de altura ✓ Medición inalámbrica vía radio de RPM y temperatura de aceite con el accesorio (opcional) ✓ Pantalla LCD con iluminación de fondo ✓ Software para PC de múltiples aplicaciones ✓ Conexión a PC vía Cable USB. Opcionalmente vía BLUETOOTH ✓ Impresora térmica de alta velocidad ✓ Mide: HC, CO, CO₂, O₂ ✓ Cálculo de Lambda y CO corregido ✓ Habilitado para medición de NO_x con sensor opcional.

Tabla 10. Rangos de medición del analizador de gases

Fuente: Autores (2017)

Rangos de medición del analizador de gases ags-688		
CO	0 - 9.99%	RES.: 0.01
CO ₂	0 - 19.9%	RES.: 0.1
HC	0 – 9999 ppm	RES.: 1
Lambda	0.5 – 5 L	RES.: 0.001
O ₂	0 – 25%	RES.: 0.01
*NO _x	0 – 5000 ppm	RES.: 1
**RPM	300 – 9990 RPM	RES.: 10
***Temperatura	20 – 250° C	RES.: 1
***Con sonda de temperatura u (opcionales).		
**Con Pinza Inductiva u (opcionales).		
*Con sensor opcional.		

2.7. Realización De Las Pruebas Experimentales

Las pruebas se realizaron en el taller de conversión Centro Gas Montería, durante 3 días en horas de la mañana para así poder tener condiciones de trabajo similares. En las pruebas, con el circuito de resistencias conectado al generador, se tomó la lectura de la intensidad de corriente eléctrica usando una pinza amperimétrica digital (Figura 11), para después determinar la potencia entregada por el motor con cada tipo de combustible.

Primero se llevaron a cabo pruebas, cuando el motor estaba utilizando gasolina como combustible, luego cuando trabajaba con GNV; por último, se realizó el mismo procedimiento para cada una de las cantidades de oxígeno suministradas al motor cuando usaba gas natural. Para cada prueba en cuestión, con el analizador se estuvo registrando las emisiones de CO, CO₂, O₂, y HC.

Cada una de las pruebas se hizo con un tiempo estipulado de 5 minutos o hasta que las temperaturas de los gases de escape superaran los 250°C.



Figura 11. Pinza Amperimétrica Referencia DT-266

Fuente: Autores (2017). Registro fotográfico

2.8. Análisis estadístico de los resultados

El análisis de los resultados se hará a través de un análisis de varianza (ANOVA) simple, para un solo factor, mediante un diseño de experimentos completamente al azar previamente elaborado, con el fin de comparar cada una de las variaciones de oxígeno suministradas al motor cuando trabaja con gas natural vehicular (GNV).

El análisis consiste en comparar las medias de cada tratamiento o nivel del experimento (variaciones de oxígeno), y a partir de ahí, decidir si los tratamientos son iguales estadísticamente en cuanto a sus medias. Para el análisis, se parte de la hipótesis fundamental, que las medias de los niveles del experimento son iguales, frente a la hipótesis alternativa de que al menos dos de ellas son diferentes (Gutiérrez & de la Vara, 2008).

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 \dots = \mu_k = \mu$$

$$H_a: \mu_i \neq \mu_j \text{ para algún } i \neq j$$

Para probar la hipótesis anteriormente descrita mediante la técnica de ANOVA, hay que descomponer la variabilidad total (suma de cuadrados) de los datos en dos componentes: la variabilidad debida a tratamientos y la que corresponde al error aleatorio; también es necesario calcular los cuadrados medios y a partir de estos valores, determinar el estadístico de prueba, para decidir si se acepta o rechaza la hipótesis fundamental (Montgomery, 2004). En la Tabla 11 se muestra una tabla ANOVA donde se plasman los valores anteriormente descritos.

Tabla 11. Tabla ANOVA para un solo factor

Fuente: Montgomery (2004) – Análisis y Diseños de Experimentos

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>GL.</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Tratamientos	$SC_{Tra.} = n \sum_{i=1}^k (\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..})^2$	$k - 1$	$CM_{Tra} = \frac{SC_{Tra.}}{k - 1}$	$F_0 = \frac{CM_{Tra}}{CM_E}$	$P(F > F_0)$
Error	$SC_E = SC_T - SC_{Tra.}$	$N - k$	$CM_E = \frac{SC_E}{N - k}$		
Total (Corr.)	$SC_T = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (\bar{y}_{ij} - \bar{y}_{..})^2$	$N - 1$			

El criterio de decisión para la aceptación o rechazo de la hipótesis fundamental (H_0), que todas las medias de los tratamientos son iguales, se basa en que para un nivel de significancia α prefijado (confianza de $[1-\alpha] \times 100 \%$), se rechaza H_0 si el valor-P $< \alpha$, de lo contrario no se rechaza. El valor-P es el área bajo la distribución F a la derecha del estadístico F_0 , es decir, el valor-P = $P(F > F_0)$.

Para el análisis de los resultados se empleará el software estadístico StatGraphics®, en este se compararán los datos de las mediciones realizadas durante las pruebas y se determinará si el oxígeno suministrado al motor cuando trabaja con gas natural vehicular

(GNV), tiene efectos sobre la potencia y las emisiones, a través de los resultados del ANOVA, calculados como se muestra en la Tabla 11.

2.8.1. Criterios del Análisis

El factor, es decir, la variable independiente y controlada de la investigación es la variación de la cantidad de oxígeno adicional, que ingresa al motor cuando trabaja con GNV. Las respuestas que se medirán con la variación del oxígeno, son la potencia y las emisiones del motor; estas emisiones son el monóxido de carbono CO, dióxido de carbono CO₂, oxígeno O₂, y los hidrocarburos sin quemar HC.

El nivel de significancia α utilizado será de 0,05, por lo que los resultados obtenidos poseerán una confianza del 95 %. En la Tabla 12 podemos observar las variables anteriormente descritas.

Tabla 12. Factores, respuestas y niveles del experimento

Fuente: Autores (2017)

Factor	Variable	Tratamientos						Unidades
	Oxígeno	0*	2	4	6	8	10	LPM**
Respuestas	Potencia (W)							%
	CO (%)							%
	CO ₂ (%)							%
	O ₂ (%)							%
	HC (%)							ppm

* Corresponde a uso exclusivo de GNV

** LPM: Litros por minutos

Con los resultados obtenidos, se determinará el nivel o tratamiento del experimento que proporciona mejores resultados, en cuanto, al aumento de la potencia, reducción de las emisiones de CO y HC, y el aumento del CO₂ como resultado de una óptima combustión; esto a través del también software de análisis estadístico Design-Expert®.

3. Resultados y discusión

3.1. Resultados obtenidos durante las pruebas

En la Tabla 13 y Tabla 14, se presentan los resultados obtenidos durante las observaciones realizadas en la investigación, de acuerdo a los procedimientos descritos con anterioridad para obtener la potencia, las emisiones de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), Oxígeno (O₂) y los hidrocarburos sin quemar (HC).

La Tabla 13 agrupa los resultados obtenidos cuando la planta eléctrica estaba trabajando exclusivamente con gasolina comercial colombiana, en lo que corresponden a potencia y emisiones.

Por su parte, la Tabla 14 muestra los resultados obtenidos cuando la planta eléctrica operaba con GNV, para cada variación de la cantidad de oxígeno suministrada en la admisión.

Tabla 13. Resultados obtenidos con Gasolina

Fuente: Autores (2017)

Prestaciones	Gasolina					Promedio
Medición	1	2	3	4	5	
Potencia (W)	1681,7	1727,4	1693,1	1704,6	1704,6	1702,3
CO (%)	0,16	0,12	0,11	0,15	0,16	0,14
CO ₂ (%)	12,1	12,4	11,9	13,1	12	12,3
O ₂ (%)	3,58	3,6	3,56	3,58	3,58	3,58
HC (ppm)	99	103	100	98	105	101

Tabla 14. Resultados Obtenidos*Fuente:* Autores (2017)

Prestaciones	Oxigeno (LPM)						
	GNV	2	4	6	8	10	15
Potencia (W)	783,90	790,20	893,72	869,36	823,18	804,92	806,99
	783,90	886,78	893,72	869,36	857,84	856,85	789,82
	801,32	886,78	868,66	869,36	831,84	856,85	772,65
	801,32	886,78	860,31	817,71	849,17	848,19	798,41
	810,03	886,78	868,66	860,75	866,50	830,88	764,07
CO (%)	0,02	0,02	0,04	0,02	0,04	0,04	0,03
	0,03	0,01	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04
	0,03	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05	0,04
	0,04	0,03	0,02	0,05	0,03	0,04	0,04
	0,03	0,02	0,03	0,05	0,05	0,04	0,03
CO2 (%)	9,40	8,60	9,20	9,10	8,20	8,20	7,90
	8,60	9,40	10,40	10,30	9,20	8,40	8,50
	10,00	10,00	11,50	9,00	8,80	8,90	8,10
	9,00	8,00	10,40	10,80	8,40	7,90	8,20
	10,00	8,50	11,00	8,80	9,40	8,60	7,80
O2 (%)	3,70	5,55	3,10	7,42	8,92	10,22	13,48
	3,55	5,62	3,40	6,94	9,24	10,36	12,98
	3,60	5,64	3,20	7,52	9,12	10,32	12,94
	3,72	5,55	2,80	7,42	8,88	10,20	13,62
	3,68	5,54	3,50	7,40	8,64	10,30	13,98
HC (ppm)	81,00	66,00	82,00	130,00	194,00	149,00	126,00
	83,00	69,00	94,00	132,00	190,00	147,00	128,00
	78,00	71,00	84,00	136,00	188,00	150,00	124,00
	86,00	69,00	92,00	134,00	191,00	148,00	129,00
	87,00	70,00	88,00	138,00	192,00	146,00	123,00

3.2. Análisis de los resultados

Con los resultados se realizó un análisis de varianza simple (ANOVA simple) para relacionar la variación de la cantidad de oxígeno admitida, con la potencia y las emisiones producidas durante la combustión por el motor. Lo anterior, con el fin de determinar si realmente existe un aumento en la potencia del motor sin sobrepasar las emisiones

permitidas, al suministrar oxígeno adicional a la cámara de combustión cuando el motor trabaja con GNV.

En la Tabla 13 se tienen la potencia y las emisiones del motor cuando trabaja con gasolina, estos parámetros se compararán con los obtenidos cuando el motor opera con gas natural. Con gasolina la potencia promedio del es de 1,7 kW, parámetro de principal interés en el estudio. Las emisiones del estudio con gasolina fueron de 0,14 % para el CO, de 123 % en el CO₂, 3,58 % para el O₂ y de 101 ppm para los HC.

3.2.1. Análisis para la potencia

Con los datos obtenidos en la investigación sobre la potencia, se procedió a realizar el ANOVA, para determinar si la variación de la cantidad de oxígeno suministrada en la admisión de aire del motor, tiene algún efecto considerable sobre la potencia del mismo. La Tabla 15 muestra el resultado del análisis, el cual indica que el valor-P de la prueba-F es menor que 0,05, por lo que existe una diferencia estadísticamente significativa en la potencia del motor a GNV, para cada caudal de Oxígeno a un nivel de confianza del 95%.

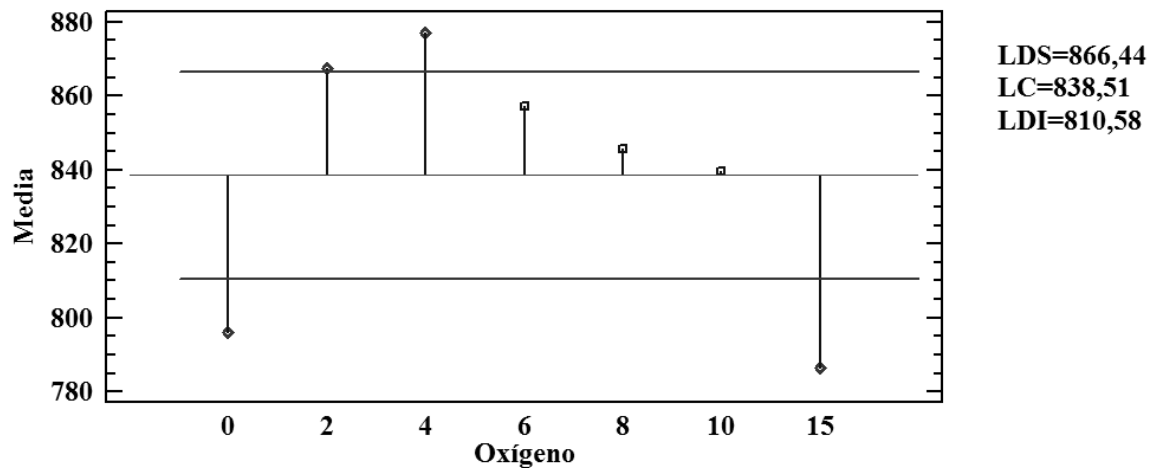
Tabla 15. ANOVA para Potencia a GNV

Fuente: Autores (2017). Análisis Software StatGraphics®

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>GL.</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Tratamientos	36226,6	6	6037,77	10,90	0,00001
Error	15505,3	28	553,762		
Total (Corr.)	51732,0	34			

Con el análisis de medias, se puede verificar la diferencia significativa que hay en la potencia media para cada variación de oxígeno. En la Gráfica 1 se observa que, para

varios caudales de oxígeno, la media se encuentra por fuera de los límites de decisión, lo cual confirma que existe una diferencia significativa en las medias a un nivel de confianza del 95 %. De igual forma, se puede observar que, entre los niveles de oxígeno empleados en el estudio, el de 4 LPM es el que mejor rendimiento proporciona al motor en cuanto a potencia, seguido del de 2 LPM.



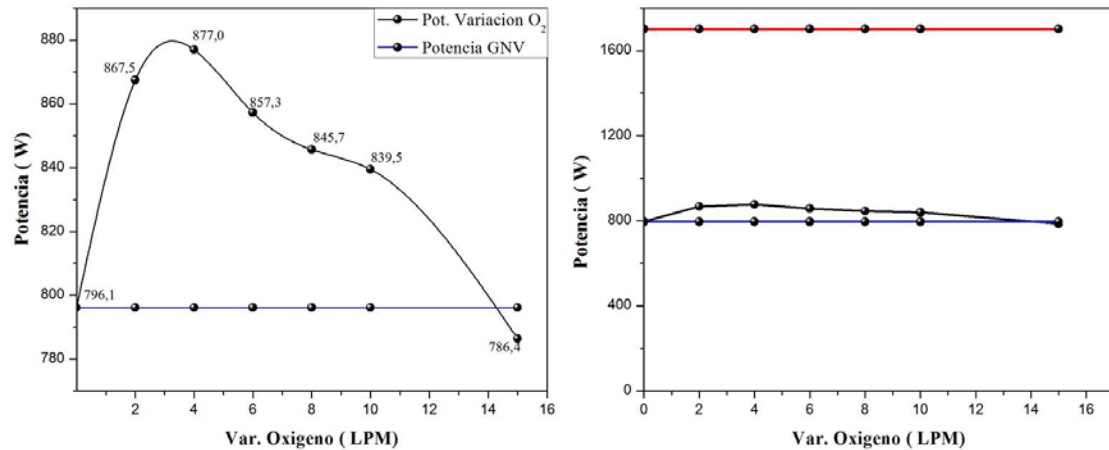
Gráfica 1. Gráfico ANOM para la potencia (con 95 % Límites de decisión)

Fuente: Autores (2017). Análisis Software StatGraphics®

Con el análisis estadístico de los resultados se ha comprobado que suministrar oxígeno al motor, produce efectos sobre su potencia. El interés se entra en encontrar los puntos donde el efecto generado sea positivo, es decir, que la potencia del motor esté por encima de la producida cuando no se alimenta con oxígeno; cabe destacar que la potencia obtenida usando GNV fue de 796 W.

Como ya se mencionó, los caudales que producen un mayor aumento en la potencia del motor son los de 4 y 2 LPM, en el primero se produce una potencia de 877 W, la cual

es la máxima obtenida en el estudio, y en el segundo se alcanzó una potencia de 868 W. Estos valores pueden ser verificados en la Gráfica 2, la cual muestra las gráficas para la potencia cuando el motor trabaja con GNV, con GNV para cada variación de oxígeno y con gasolina.



Gráfica 2. Potencia GNV, GNV Oxigenado y Gasolina

Fuente: Autores (2017). Software OriginPro 8

En general, los resultados obtenidos a la hora de oxigenar el motor cuando está utilizando GNV, permiten observar que, si hay un aumento considerable en la potencia con respecto a la obtenida con gas natural sin oxigenar, pero, este aumento en comparación con la potencia entregada por el motor cuando emplea gasolina como combustible, es relativamente pequeño.

3.2.2. Análisis para las emisiones de monóxido de carbono (CO)

Con los datos obtenidos acerca de las emisiones de CO, se realizó el análisis de varianza, para determinar si la variación del oxígeno adicional suministrado al motor, tiene algún efecto sobre dichas emisiones, cuando éste trabaja con GNV como combustible. En

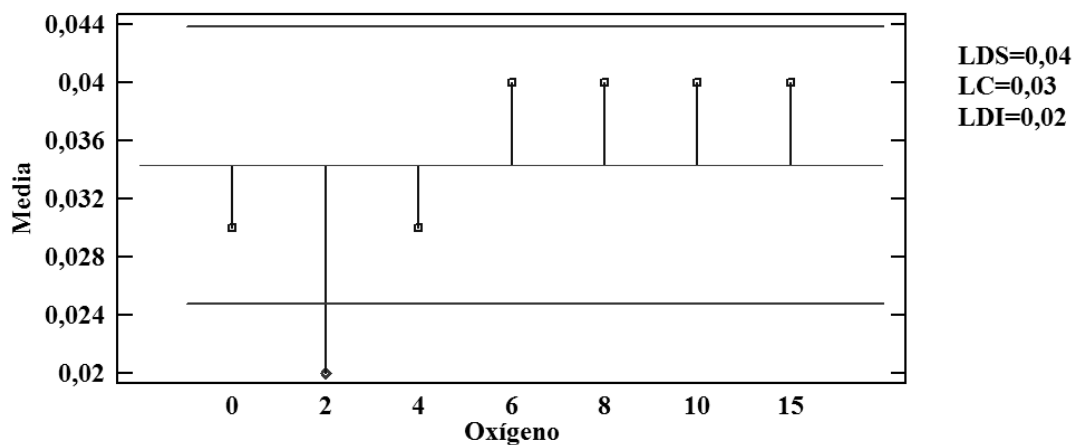
la Tabla 16 se puede observar que el valor-P de la prueba-F es menor que 0,05. Lo anterior, sugiere que existe una diferencia estadísticamente significativa, en por lo menos dos medias de las emisiones de CO entre un caudal de Oxígeno y otro, a un nivel de confianza del 95,0 %.

Tabla 16. ANOVA para las emisiones de CO

Fuente: Autores (2017). Análisis Software StatGraphics®

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>GL</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Tratamientos	0,00185714	6	0,0003095240	4,81	0,0017
Error	0,00180000	28	0,0000642857		
Total (Corr.)	0,00365714	34			

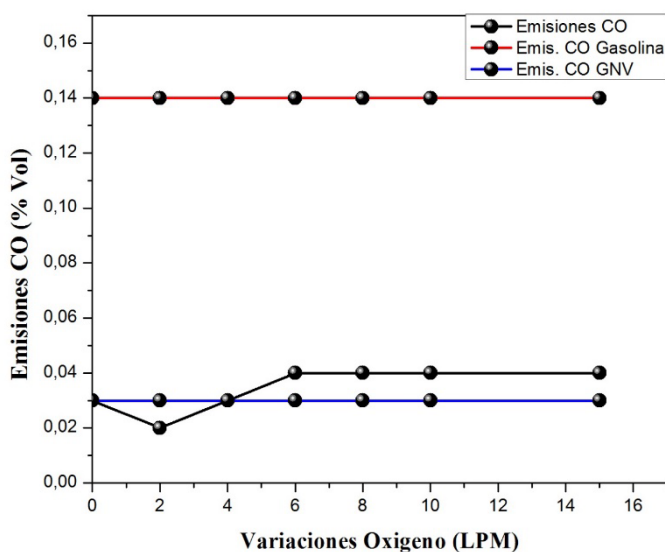
En la Gráfica 3, se muestra el grafico del análisis de medias para las emisiones de CO, el cual muestra que solamente el caudal de 2LPM, presenta emisiones por fuera de los límites de decisión. Cuando hay valores por fuera de dichos limites, significa que existe una diferencia estadísticamente significativa, entre las medias de los distintos caudales de oxígeno y la media general, sin embargo, en este caso solo hay un caudal que presenta dicha diferencia, como ya se mencionó.



Gráfica 3. ANOM para las emisiones de CO (con 95 % Limites de decisión)

Fuente: Autores (2017). Análisis Software StatGraphics®

Al igual que la potencia, las emisiones de CO varían de cierto modo con la oxigenación del motor. En este caso, el interés se centra en que las emisiones se reduzcan o permanezcan igual a las producidas cuando el motor opera únicamente con GNV. Los caudales de oxígeno suministrados que cumplen con estas características, son los de 2 y 4 LPM, con 0,02 % y 0,03 % respectivamente como se puede ver en la Gráfica 4.



Gráfica 4. Emisiones CO: GNV, GNV Oxigenado y Gasolina

Fuente: Autores (2017). Software OriginPro 8

En la gráfica también se observa que las emisiones de CO, cuando el motor trabaja con GNV son bastante bajas en comparación a las de gasolina. Además, se nota que al oxigenar el motor (GNV) se presenta un mínimo aumento en las emisiones de CO para los caudales de oxígeno de 6, 8, 10 y 15 LPM; lo anterior sugiere que los CO no presentan mucha variación cuando aumenta la cantidad de oxígeno que ingresa al motor.

La formación de CO ocurre siempre, aunque haya exceso de oxígeno y se debe a dos causas, la cinética de la reacción de combustión y la falta de oxígeno localmente, que

favorecen su formación. Durante la combustión a altas temperaturas, la cinética es muy rápida y se alcanza un equilibrio entre CO y CO₂. Cuando la combustión finaliza y comienza la expansión de los gases en el motor, la temperatura desciende, por lo que el equilibrio tiende a oxidar el monóxido de carbono, pero la cinética es lenta y la reacción de oxidación se puede llegar a detener, de manera que el CO no alcanza a convertirse en CO₂ (Rovira & Muñoz, 2015).

3.2.3. Análisis para las emisiones de dióxido de carbono CO₂

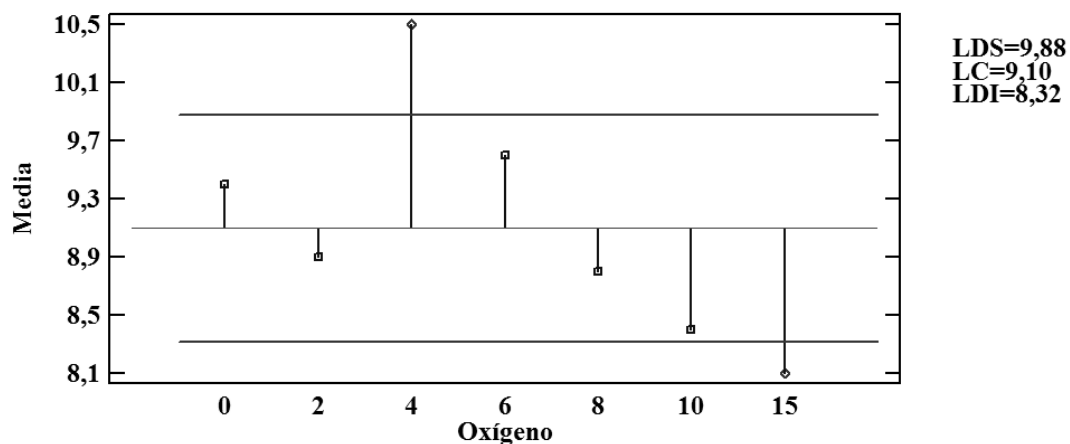
A partir de los datos obtenidos se realizó el ANOVA de las emisiones de CO₂, en él se encontró, que el valor-P de la prueba-F es menor que 0,05, de forma que existe una diferencia estadísticamente significativa, en por lo menos dos medias de las emisiones de CO₂ entre un caudal de Oxígeno y otro, a un nivel de confianza del 95,0 % (Tabla 17). De este modo, las variaciones en la cantidad de oxígeno producen variaciones en las emisiones de dióxido de carbono.

Tabla 17. ANOVA para las emisiones de CO₂

Fuente: Autores (2017). Análisis Software StatGraphics®

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>GL</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Tratamientos	19,6	6	3,26667	7,56	0,0001
Error	12,1	28	0,432143		
Total (Corr.)	31,7	34			

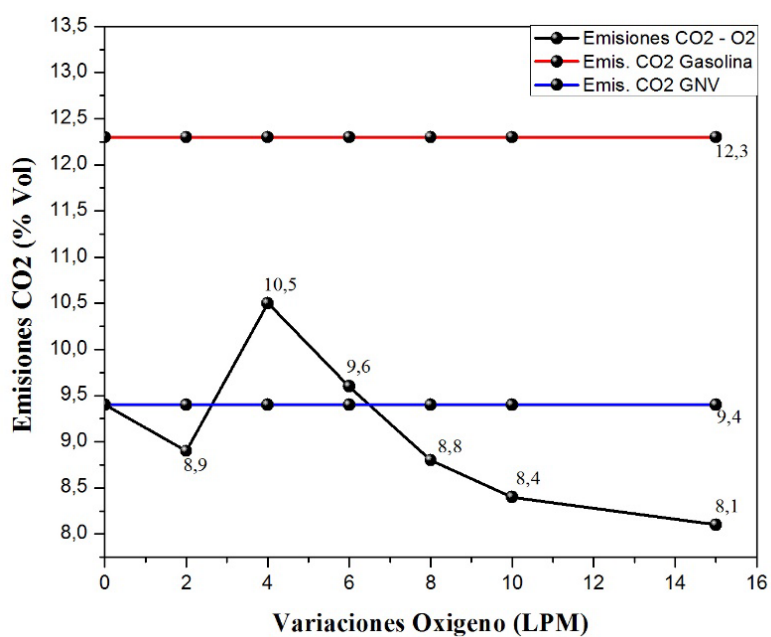
El grafico del análisis de medias de la **Gráfica 5**, confirma la diferencia entre las medias al existir valores por fuera de los límites de decisión, éste grafico también muestra que las máximas emisiones de CO₂, se presentaron para un caudal de 4 LPM donde la potencia entregada por el motor también es máxima.



Gráfica 5. ANOM para las emisiones de CO₂ (con 95 % Limites de decisión)

Fuente: Autores (2017). Análisis Software StatGraphics®

En la **Gráfica 6** se muestran las emisiones de dióxido de carbono, en ella se observa que las emisiones con GNV en ninguno de los casos sobrepasan las producidas con gasolina.



Gráfica 6. Emisiones CO₂: GNV, GNV Oxigenado y Gasolina

Fuente: Autores (2017). Software OriginPro 8

De la anterior gráfica se infiere que la conversión del motor a GNV reduce las emisiones de CO₂, también se aprecia que, al oxigenar la mezcla las emisiones están por encima de las producidas a GNV, para los caudales de oxígeno de 4 y 6 LPM, lo que sugiere que en estos puntos la oxigenación ha mejorado la combustión (Kalam & Masjuki, 2011), en comparación a la obtenida con gas natural sin oxigenar.

Sin embargo, para los otros caudales de oxígeno, las emisiones de CO₂ estuvieron por debajo de las que emite el motor cuando emplea GNV, por lo que en estos puntos la combustión es ineficiente.

3.2.4. Análisis para las emisiones de oxígeno O₂

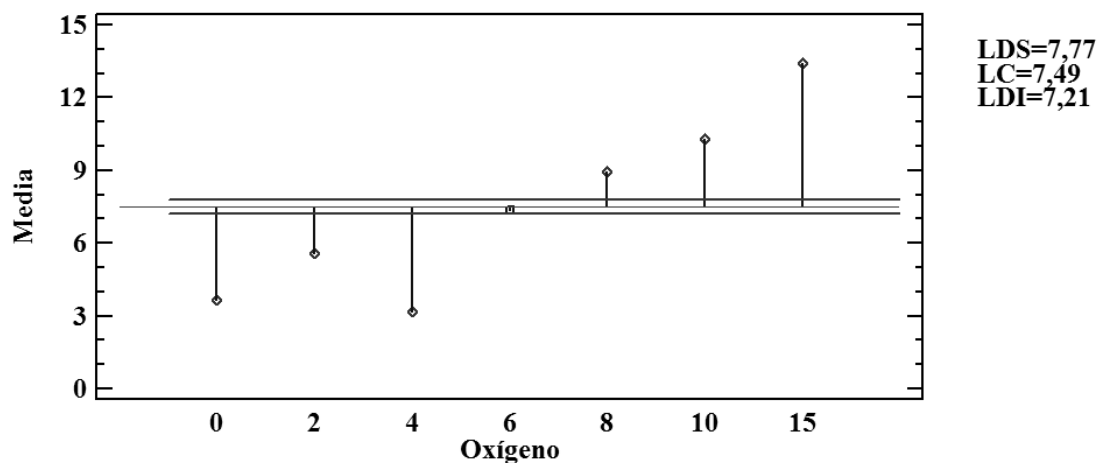
El ANOVA para las emisiones de O₂ que se observa en la Tabla 18, evidencia que existe una diferencia estadísticamente significativa en las emisiones de oxígeno para cada caudal, dado que el valor-p de la prueba-F es menor que 0,05 con un 95 % de confianza.

Tabla 18. ANOVA para las emisiones de O₂

Fuente: Autores (2017). Análisis Software StatGraphics®

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>GL</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Tratamientos	408,467	6	68,0778	1229,63	0,00001
Error	1,5502	28	0,05536		
Total (Corr.)	410,017	34			

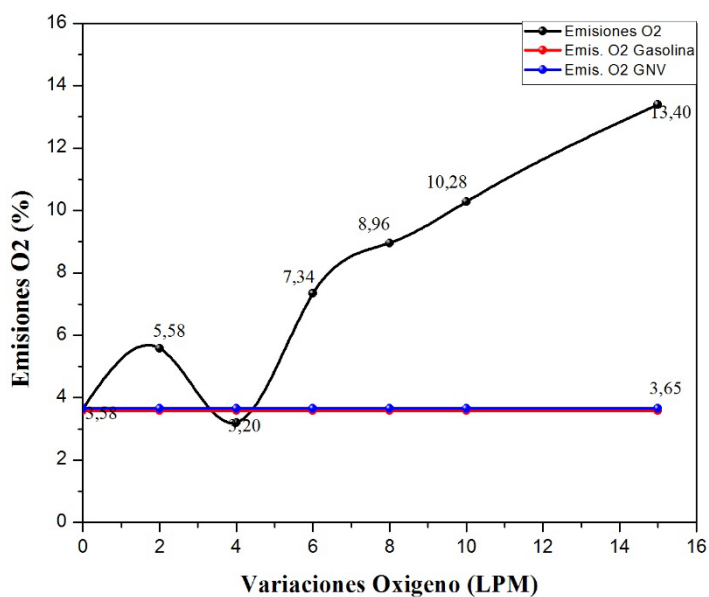
En la Gráfica 7 se puede confirmar la diferencia en las emisiones, para cada caudal de oxígeno suministrado al motor durante las pruebas. La grafica evidencia que la mayoría de las medias son muy diferentes a la media general, al estar por fuera de los límites de decisión; también se puede observar que estas emisiones aumentan a partir de 8 LPM.



Gráfica 7. ANOM para las emisiones de O₂ (con 95 % Límites de decisión)

Fuente: Autores (2017). *Análisis Software StatGraphics®*

En la Gráfica 8 se muestran las emisiones de O₂ para los casos estudiados, en ella se puede apreciar que dichas emisiones son iguales para gasolina y GNV, evidenciando que al motor ingresa solamente aire atmosférico, lo que no sucede para el GNV oxigenado.



Gráfica 8. Emisiones O₂: GNV, GNV Oxigenado y Gasolina

Fuente: Autores (2017). *Software OriginPro 8*

Como se puede ver en la gráfica al oxigenar la mezcla (GNV-Aire), se presenta por obvias razones un aumento en las concentraciones de oxígeno de las emisiones para algunos caudales, también se observa que cuando están ingresando 4 LPM de oxígeno a la mezcla se manifiesta algo particular en la gráfica y es que disminuye la cantidad de oxígeno presente en las emisiones en comparación con el motor cuando este utiliza gasolina o GNV como combustibles.

Lo anterior, sucede porque la concentración de oxígeno en las emisiones depende del rendimiento de la combustión, el cual, a su vez está relacionado con las emisiones de CO₂ (Kalam & Masjuki, 2011). Como pudo observarse en la gráfica de emisiones del CO₂, hay un aumento de éste cuando ingresan 4 LPM de oxígeno a la mezcla; lo que produce una disminución en las concentraciones de oxígeno en las emisiones, lo que sugiere que la combustión es bastante óptima para ese caudal.

3.2.5. Análisis para las emisiones de hidrocarburos sin quemar HC

En cuanto las emisiones de los hidrocarburos sin quemar, el ANOVA presentado en la Tabla 19 muestra que el valor-P es menor que 0,05, por lo que existe una diferencia estadísticamente significativa en las emisiones de HC, para cada caudal de oxígeno suministrado. Lo anterior evidencia la influencia del oxígeno en este tipo de emisiones.

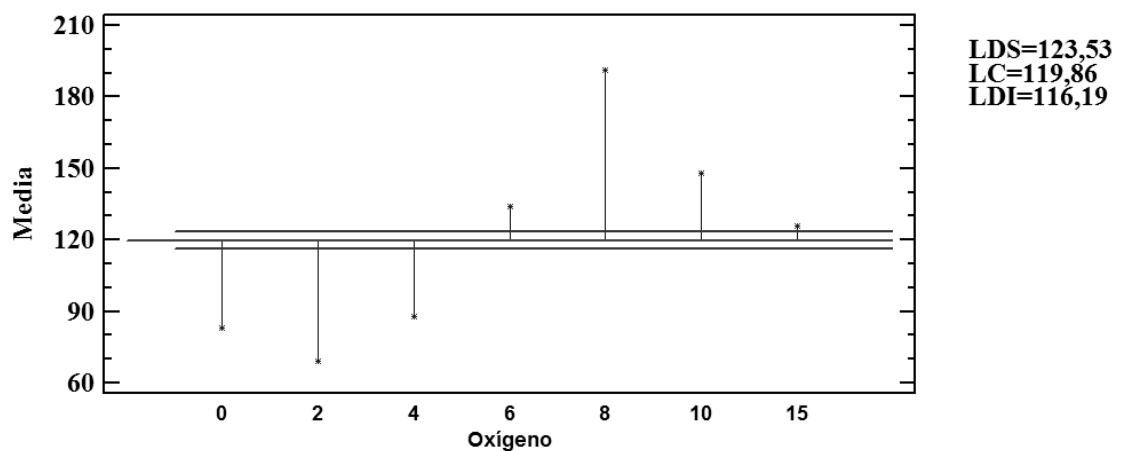
Tabla 19. ANOVA para las emisiones de HC

Fuente: Autores (2017). Análisis Software StatGraphics®

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>GL</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Tratamientos	55254,3	6	9209,05	962,14	0,00001
Error	268,000	28	9,57143		
Total (Corr.)	55522,3	34			

Al encontrarse valores por fuera de los límites de decisión, en la Gráfica 9 se puede confirmar la diferencia entre las emisiones de HC para cada caudal de oxígeno suministrado y la media general.

En la figura también se observa que las emisiones mínimas de HC se presentaron cuando el caudal de oxígeno suministrado fue de 2 LPM.

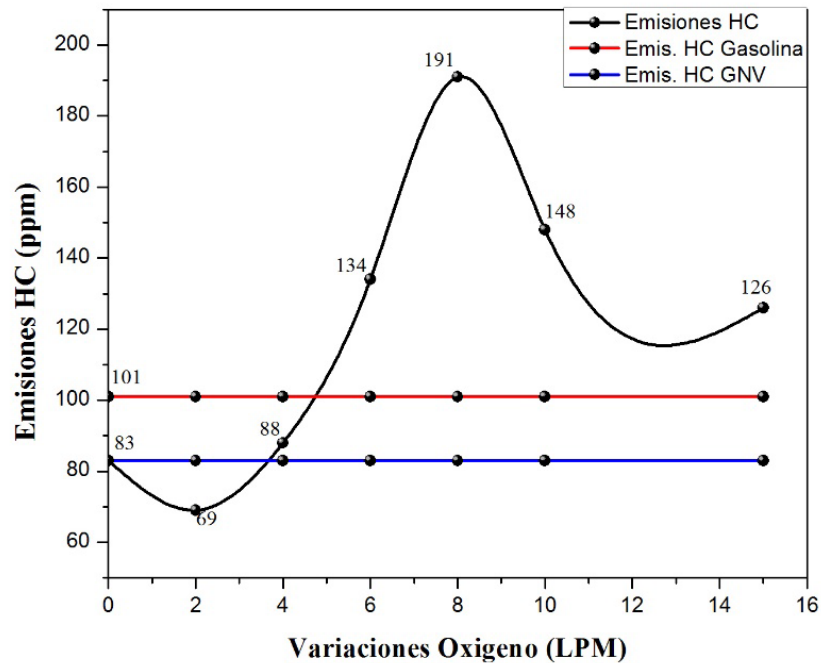


Gráfica 9. ANOM para las emisiones de HC (con 95 % Límites de decisión)

Fuente: Autores (2017). Análisis Software StatGraphics®

En la Gráfica 10 se presentan las emisiones de los hidrocarburos sin quemar para cada escenario del estudio, en ella se encuentra que las emisiones bajaron de 103 a 83 ppm cuando se utilizó GNV en vez de gasolina, lo que confirma, el carácter de menos contaminante que tiene el gas natural.

En la gráfica también se puede ver que, durante la oxigenación las mínimas emisiones de HC se presentaron en 2 LPM con 69 ppm.



Gráfica 10. Emisiones HC: GNV, GNV Oxigenado y Gasolina

Fuente: Autores (2017). Software OriginPro 8

La gráfica anterior también muestra que, en la mayoría de los casos los HC están por encima de las emisiones producidas con GNV o gasolina, esto debido a que el combustible pudo estar sometido a un proceso de pirolisis, producto de un aumento excesivo de la temperatura al momento de oxigenar el motor, lo que incrementa la cinética química de la combustión (Rovira & Muñoz, 2015).

Lo anterior, facilita la reacción de radicales libres de carbón entre sí, de forma que se producen compuestos aromáticos que acaban saliendo al exterior. Otra causa del aumento en los HC, puede asociarse a una mezcla pobre en combustible, lo cual provoca que no se desarrolle adecuadamente la propagación de la llama, al rozar los límites de inflamabilidad (Sánchez, 2007).

La presencia y el incremento de los HC, reside en que son emisiones de combustible que no ha sido oxidadas en el proceso de combustión. Este combustible según afirma Rovira y Muñoz (2015), proviene de zonas más frías de la cámara de combustión a las que no alcanza propagarse la llama, por lo que, la emisión de HC es un problema que se debe más a características físicas que químicas.

3.3. Determinación del nivel óptimo de Oxígeno suministrado

Para determinar cuál es la cantidad adicional de oxígeno suministrado, que produce el mejor efecto sobre las prestaciones del motor convertido a GNV, se emplea el software Design-Expert®, teniendo como parámetro que la potencia sea máxima, sumada a que las emisiones del motor, cumplan con los porcentajes establecidos en los Artículos 5 y 6 de la Resolución 910 de 2008 del Ministerio de Ambiente (ANEXO 1).

Tabla 20. Resultados promedios para cada variación de Oxígeno

Fuente: Autores (2017)

		Prestaciones				
		Potencia (W)	Emisiones			
			CO (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	HC (ppm)
Oxígeno (LPM)	Gasolina	1702,3	0,14	12,3	3,58	101
	GNV	796,1	0,03	9,4	3,65	83
	2	867,5	0,02	8,9	5,58	69
	4	877,0	0,03	10,5	3,2	88
	6	857,3	0,04	9,6	7,34	134
	8	845,7	0,04	8,8	8,96	191
	10	839,5	0,04	8,4	10,28	148
	15	786,4	0,04	8,1	13,4	126

En la Tabla 20, se muestran los resultados promedios para la gasolina, el GNV, así como para cada variación de oxígeno ingresado a la admisión del motor, cuando era

accionado con GNV. Por su parte, la Tabla 21 muestra el cumplimiento o no, de las emisiones por parte de cada uno de los tratamientos realizados en el proyecto.

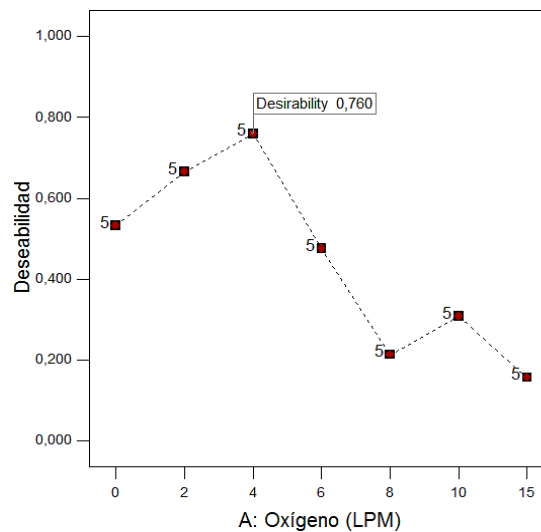
Tabla 21. Cumplimiento de las Normas de Emisiones Vigentes

Fuente: Autores (2017)

		Emisiones			
		CO (%)	CO2 (%)	O2 (%)	HC (ppm)
Oxígeno (LPM)	Norma*	0,8	≥ 7	≤ 5	180
	Gasolina	Si	Si	Si	Si
	GNV	Si	Si	Si	Si
	2	Si	Si	No	Si
	4	Si	Si	Si	Si
	6	Si	Si	No	Si
	8	Si	Si	No	No
	10	Si	Si	No	Si
	15	Si	Si	No	Si

* Resolución 910 MinAmbiente (2008)

En la Tabla 21, se aprecia que además de la gasolina y el GNV, el único caudal de oxígeno suministrado al motor, que cumple con las emisiones permitidas, es el de 4 LPM, el cual, también coincide con la máxima potencia que entrega el motor con GNV.



Gráfica 11. Deseabilidad de los Resultados

Fuente: Autores (2017). Design-Expert®

Lo anteriormente descrito, se puede corroborar con la Gráfica 11, la cual proviene de un análisis de optimización, realizado mediante el software Design-Expert®. Esta gráfica, muestra la deseabilidad para cada uno de los caudales de oxígeno suministrados, evidenciando que el caudal de 4 LPM, es el nivel óptimo de oxigenación con una deseabilidad de 0,760; éste punto, es donde la potencia entregada por el motor se hace máxima, y todas las emisiones producidas cumplen con los porcentajes permitidos en la Resolución 910 de 2008.

En la Tabla 22 se presentan los criterios para la optimización. De igual forma la Tabla 23 muestra los resultados obtenidos con la optimización.

Tabla 22. Restricciones para la optimización

Fuente: Autores (2017). Análisis Software Design-Expert®

Nombre	Meta	Limite		Peso		Importancia
		Inferior	Superior	Inferior	Superior	
A: Oxígeno	En el rango	0	15	1	1	3
Potencia	Maximizar	764	894	1	1	5
CO	Minimizar	0,01	0,05	1	1	5
CO2	Maximizar	7,8	11,5	1	1	5
O2	Minimizar	2,8	13,98	1	1	5

Tabla 23. Solución para los niveles estudiados

Fuente: Autores (2017). Análisis Software Design-Expert®

	Oxígeno	Potencia	CO	CO2	O2	HC	Deseabilidad	
1	4	0,877	0,03	10,5	3,2	88	0,760	Seleccionado
2	2	0,868	0,02	8,9	5,58	69	0,665	
3	0	0,796	0,03	9,4	3,65	83	0,532	
4	6	0,857	0,04	9,6	7,34	134	0,475	
5	10	0,84	0,04	8,4	10,28	148	0,309	
6	8	0,846	0,04	8,8	8,96	191	0,214	
7	15	0,786	0,04	8,1	13,4	126	0,157	

3.4. Verificación de los supuestos del modelo

La validez de los resultados obtenidos en cualquier análisis de varianza queda sujeta a que los supuestos de normalidad, varianza constante (igual varianza de los tratamientos o niveles del experimento) e independencia del modelo se cumplan. Esto significa que la respuesta se debe distribuir de manera normal, con la misma varianza en cada tratamiento y las mediciones deben ser independientes entre sí (Montgomery, 2004).

Para el análisis de cada uno de los supuestos del modelo se empleó el software StatGraphics® y Design-Expert®, con el fin de corroborar el cumplimiento de cada uno de los tres supuestos del modelo; en cuanto al de normalidad se verificó con la gráfica de gráfica de probabilidad normal, el sesgo y la curtosis estandarizada.

Para la varianza constante se grafican los predichos contra los residuos, para establecer, si los puntos en esta gráfica se distribuyen de manera aleatoria en una banda horizontal (sin ningún patrón claro y contundente), y así verificar que se cumple el supuesto de que los tratamientos tienen igual varianza. Además, se realizó la prueba de Bartlett para comprobar la hipótesis de igualdad de varianzas (Gutiérrez & de la Vara, 2008).

La suposición de independencia en los residuos puede verificarse si se grafica el orden en que se colectó un dato contra el residuo correspondiente. De esta manera, si al graficar en el eje horizontal el orden de corrida y en el eje vertical los residuos, se detecta una tendencia o patrón no aleatorio claramente definido, se evidencia que existe una correlación entre los errores y, por lo tanto, el supuesto de independencia no se cumple.

Tabla 24. Resumen de la verificación de los supuestos del modelo

Fuente: Autores (2017). Análisis Software StatGraphics®

Variable	Normalidad		Verificación de la varianza	
	Sesgo	Curtosis	Prueba de Bartlett (Valor-P)	
Potencia	-0,671201	-1,51232	0,202867	Cumple
Emisiones CO	-0,727741	-0,596437	0,878120	Cumple
Emisiones CO ₂	1,862890	-0,225589	0,307928	Cumple
Emisiones O ₂	0,823944	-1,202620	0,356056	Cumple
Emisiones HC	0,966582	-1,085210	0,294308	Cumple
Emisiones NO _x				
Criterio	Entre [-2,2]	Entre [-2,2]	Mayor que 0,05	

En la Tabla 24 se muestran los estadísticos de prueba para comprobar la normalidad de los resultados obtenidos, en ella se evidencia que los resultados para la potencia, las emisiones de CO y CO₂ cumplen con los supuestos del modelo ANOVA, por lo que los resultados obtenidos a partir del análisis de varianza tienen validez estadística.

CONCLUSIONES

La conversión a gas natural vehicular (GNV), del generador eléctrico de la marca Bauker se realizó de forma exitosa, permitiendo que el motor pudiera ser accionado mediante gasolina o GNV de manera independiente.

En general, la oxigenación del motor después de ser convertido a gas natural vehicular, produce efectos positivos en las prestaciones del motor para ciertos niveles de oxígeno suministrados en la admisión.

Cuando el motor del generador eléctrico fue accionado con gasolina, la potencia máxima obtenida fue de 1.702 W, produciendo emisiones acordes a las disposiciones de la Resolución 910 de 2008, la cual es la normatividad ambiental vigente en lo relacionado con gases de escapes.

Con el motor empleando GNV sin oxigenar, la potencia obtenida fue de 797 W, lo que representó una disminución alrededor del 48,5 % con respecto a la obtenida usando gasolina. Esta disminución está asociada a la tecnología de alimentación del motor, la cual se hace a través de un carburador, por lo que la conversión es de primera generación.

Que la tecnología sea de lazo abierto o primera generación, quiere decir que no hay control del consumo de combustible y la calibración del equipo debe hacerse manualmente, lo que imposibilita que el motor se autorregule de acuerdo al régimen de operación. La menor densidad de energía presente el combustible, también es un factor determinante para dicha disminución.

El suministro de oxígeno para enriquecer el aire admitido, influye de forma positiva en la potencia del motor, durante este proceso la máxima potencia obtenida fue de 877 W, lo que representó, un incremento alrededor del 10 % con respecto a la producida con GNV sin oxigenar.

Las emisiones producidas después de la conversión del motor a GNV, se redujeron en un 78,6 % para el CO, 23,6 % para el CO₂ y un 17,8 % para los HC, evidenciando el menor efecto contaminante que posee el GNV respecto a la gasolina. En cambio, las emisiones de O₂ presentaron un leve incremento de 2 %.

Las emisiones de CO y CO₂ producidas durante la oxigenación del motor, no superan las generadas cuando el motor es accionado con gasolina, sin embargo, las emisiones de HC y O₂ si superan las emisiones a gasolina y las permitidas para algunos caudales de oxígeno. También es de resaltar que, en las emisiones de CO, las variaciones entre ellas son mínimas cuando el motor emplea GNV oxigenado o sin oxigenar; ya que las emisiones de CO con GNV sin oxigenar son de 0,3 % y las de GNV oxigenado están en el rango de 0,2 % y 0,4 % del volumen.

Las emisiones de CO₂ presentaron cierta peculiaridad para los caudales de 8, 10 y 15 LPM, debido a que en estos caudales las emisiones fueron disminuyendo de forma paulatina, mostrando así que a medida que aumentaba el oxígeno en la mezcla, la combustión iba haciéndose menos eficiente, y las emisiones de CO₂ están estrechamente relacionadas con la eficiencia de la combustión.

Las emisiones de HC ciertamente en su mayoría aumentaron al oxigenar el motor, pero para el caudal de 2 LPM se redujeron 21,6 % con respecto a usar GNV sin oxigenar. En comparación con las emisiones producidas con la gasolina, los HC se redujeron 31,7 %, siendo en 2 LPM, la combustión más eficiente en relación a dichas emisiones, debido a que entre más HC estén presente en los gases, mas incompleta será la combustión.

En conclusión, durante el estudio se encontró que la máxima potencia obtenida con la oxigenación del motor, se presentó para un suministro de oxígeno al motor de 4 LPM (877 W), alrededor de 10 % mayor que la obtenida con GNV sin oxigenar. Además, este punto de operación es el único que cumple con las emisiones permitidas según la resolución 910 de 2008, siendo entonces el nivel óptimo de oxigenación para un motor.

RECOMENDACIONES

Realizar estudios de oxigenación en motores convertidos a gas natural vehicular (GNV), que sean de mayor tamaño y con mejores tecnologías de alimentación, para que el proceso de conversión sea de tercera generación o superior, con el fin de que la combustión del motor sea más eficiente y se pueda evaluar que tan positivo o no, resulta oxigenar estos motores.

Hacer un estudio más detallado empleando un motor de 4 tiempos de un vehículo convertido a gas natural, para realizar las mismas pruebas, variar las RPM y además acoplar un sistema de transmisión que varíe el régimen de carga del motor.

Utilizar para nuevos estudios, equipos de instrumentación que permitan medir los consumos de combustible por el motor. Así como disponer de un analizador de gases propio, para analizar cada uno de los elementos presentes en las emisiones.

Para motores similares al del estudio, se recomienda oxigenar el aire de la admisión entre caudales de 2 y 4 LPM, pues por encima de ese rango, las mejoras en la potencia empiezan a decaer y las emisiones producidas no cumplen la Resolución 910 de 2008. Además, entre mayor sea el caudal de oxígeno suministrado, mayor serán los costos asociados para producir 1 W de potencia.

Realizar estudios sobre el efecto que tiene sobre las prestaciones, suministrar hidrógeno a un motor de combustión interna convertido a GNV. Dado que, enriquecer el gas natural con hidrógeno es una alternativa emergente en combustibles gaseosos, que se ha venido investigado en motores mono-cilíndricos (Verma, et al., 2016), como el empleado en la investigación.

Bibliografía

- AIS 3D. (2017).** *Productos: Analizadores de Gases*. Obtenido de Sitio Web AIS 3D:
<http://www.ais3d.com.co/tools/>
- Álvarez F., J., Callejón A., I., & Forns F., S. (2005).** *Motores alternativos de combustión interna*. Barcelona: Universidad Politècnica de Catalunya.
- B&H Landirengo. (2017).** *Productos: Válvulas*. Obtenido de Sitio Web B&H Landirengo: <http://www.byh.com.ar/valvulas/electrovalvula-de-nafta>
- Buelvas A., S., & Lopez A., J. (2016).** *Evaluación técnico-económica de mezclas etanol - gasolina en un motor de Ciclo Otto*. Montería: Universidad de Córdoba.
- Cengel, Y., & Boles, M. (2009).** *Termodinámica* (8 ed.). México D. F.: McGraw Hill.
Obtenido de <http://www.ebooks7-24.com>
- Gases de Occidente. (2017).** *Tecnologías*. Obtenido de Gases de Occidente:
<http://www.gdo.com.co/vehiculos/tecnologias>
- Gutiérrez, H., & de la Vara, R. (2008).** Experimentos con un solo factor (análisis de varianza). En *Análisis Y Diseño de Experimentos* (págs. 62-69). México D.F.: McGraw-Hill.
- Import Corporal Medical S.A.S. (2017).** *Productos*. Obtenido de Sitio Web Import Corporal Medical S.A.S: <http://www.corporalmedical.oferto.co/main-productos-pagina-3>
- Kalam, M. A., & Masjuki, H. H. (2011).** An experimental investigation of high performance natural gas engine with direct injection. *Energy*, 7.
- Landirengo. (2017).** *Productos: Componentes*. Obtenido de Sitio Web Landirengo:
http://www.landirengo.com.br/es/?target=componentes_interno&sid=1&uid=54&cid=12
- Mada Inc. (2017).** *Oxygen Regulators*. Obtenido de Sitio Web Mada Inc. :
<https://www.madamedical.com/category/oxygen-regulators/product/M1935-15GB/>
- Martí Perera, A. (1997).** *Inyección electrónica en motores diésel*. México: Alfaomega.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2008). *Resolución 910 de 2008*. Bogotá: MinAmbiente.

- Montgomery, D. (2004).** Experimentos con un solo factor: el análisis de varianza. En *Diseño y Análisis de Experimentos* (págs. 60-70). México D.F.: Limusa.
- Pulkrabek, W. (1997).** *Engineering fundamentals of the internal combustion engine*. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall.
- Rovira, A., & Muñoz, M. (2015).** *Motores de combustión interna*. Madrid: ES: UNED - Universidad Nacional de Educación a Distancia. Obtenido de <http://www.ebrary.com>
- Sánchez, C. (2007).** Teoría de Combustión. En C. S. Naranjo, *Teoría de Combustión*. Madrid: Unidades Didácticas.
- Stone, R., & Ball, J. K. (2004).** *Fundamentals Automotive Engineering*. Warrendale, Pa: SAE International.
- Sunny Steel Enterprise Ltd. (2017).** *Productos: Tubos de alta presión*. Obtenido de Sitio Web Steel Enterprise Ltd: <http://www.sunnysteel.com/espanol/CNG-tubos-de-alta-presion.php>
- Tomasetto Achille. (2017).** *Productos: Válvulas de GNC*. Obtenido de Sitio Web Tomasetto Achille: <https://www.tomasetto.com/es/productos/valvulas-de-gnc/valvulas-de-cilindro/vm01-ventilata-1>
- Tomasetto Lovato. (2006).** *Manual de instalación de equipos de GNC para automotores*. Argentina.
- UPME. (2014).** *Estudio de tecnologías disponibles para incentivar el uso del gas combustible en el Sector Transporte*. Bogotá: Universidad Nacional De Colombia – Facultad De Ingeniería.
- UPME: Unidad de Planeación Minero Energética. (2016).** *Calculadora de emisiones Fecoc 2016*. Obtenido de http://www.upme.gov.co/calculadora_emisiones/aplicacion/calculadora.html
- Verma, G., Prasad, R., Agarwal, R., Jain, S., & Agarwal, A. (2016).** Experimental investigations of combustion, performance and emission characteristics of a hydrogen enriched natural gas fuelled prototype spark ignition engine. *Fuel*, 178, 209-217.

Anexo 1. Marco legal

Resolución 910 de 2008.

Por la cual se reglamentan los niveles permisibles de emisión de contaminantes que deberán cumplir las fuentes móviles terrestres, se reglamenta el artículo 91 del Decreto 948 de 1995 y se adoptan otras disposiciones

EL MINISTRO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL

En ejercicio de sus funciones legales, y en especial las conferidas en los numerales 2, 10, 11, 14 y 25 del Artículo 5 de la Ley 99 de 1993, en los artículos 65, 91, 92 y en los Capítulos IV y VIII del Decreto 948 de 1995 que contiene el Reglamento de Protección y Control de la Calidad del Aire.

C O N S I D E R A N D O:

Que el Artículo 78 de la Constitución Política establece que el saneamiento ambiental es un servicio público a cargo del Estado. Que los artículos 79 y 80 de la Constitución Política establecen como obligación del Estado, proteger la diversidad e integridad del ambiente; fomentar la educación ambiental; prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental; imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados.

Que de conformidad con el numeral 25 del Artículo 5 de la Ley 99 de 1993, corresponde al Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial establecer los límites máximos permisibles de emisión que puedan afectar el medio ambiente o los recursos naturales renovables.

Que el literal b del Artículo 4 del Decreto 948 de 1995 establece que la quema de combustibles fósiles utilizados por el parque automotor, es una actividad contaminante sujeta a prioritaria atención y control por parte de las Autoridades Ambientales.

Que de conformidad con el Artículo 65 y el Capítulo IV del Decreto 948 de 1995 que contiene el Reglamento de Protección y Control de la Calidad del Aire, le corresponde al Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial establecer los estándares permisibles de emisión

de contaminantes producidos por fuentes móviles, para lo cual debe establecer las regulaciones, prohibiciones y restricciones sobre emisiones contaminantes de fuentes móviles.

Que con base en estudios científicos y técnicos de calidad del aire en el territorio nacional y la información de las pruebas de verificación del cumplimiento de las normas establecidas en la Resolución 005 de 1996, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial considera necesario establecer normas de emisión para vehículos automotores activados con gasolina y diésel (ACPM), con el propósito de proteger el medio ambiente, los recursos naturales renovables y la salud de la población en general.

En mérito de lo expuesto,

RESUELVE:

Objeto. La presente resolución establece los niveles máximos permisibles de emisión de contaminantes que deben cumplir las fuentes móviles terrestres, reglamenta los requisitos y certificaciones a las que están sujetos los vehículos y demás fuentes móviles, sean importadas o de fabricación nacional, y se adoptan otras disposiciones.

Artículo 5. Límites máximos de emisión permisibles para vehículos a gasolina. En la Tabla 1 se establecen los máximos niveles de emisión que podrá emitir toda fuente móvil clasificada como vehículo automotor con motor a gasolina, durante su funcionamiento en velocidad de crucero y en condición de marcha mínima, ralentí o prueba estática, a temperatura normal de operación.

Tabla 1. Límites máximos de emisión permisibles para vehículos accionados con gasolina

Año modelo	CO (%)	HC (ppm)
1970 y anterior	5,0	800
1971 – 1984	4,0	650
1985 – 1997	3,0	400
1998 y posterior	1,0	200

Parágrafo Primero: Cuando la concentración de O₂ exceda el 5% o la concentración de CO₂ sea inferior al 7%, se entenderá que existe dilución de la muestra y el vehículo automotor deberá ser rechazado.

Parágrafo Segundo: A partir de los vehículos año modelo 2010, los comercializadores representantes de marca, importadores, fabricantes o ensambladores de dichos vehículos deberán garantizar una emisión máxima permisible equivalente al 80% del valor establecido en la Tabla 1 para los vehículos con año modelo 1998 y posterior.

Artículo 6. Límites máximos de emisión permisibles para vehículos bi-combustibles gasolina -gas natural vehicular o gasolina - GLP. En la Tabla 2 se establecen los máximos niveles de emisión que podrá emitir toda fuente móvil clasificada como vehículo automotor convertido a gas natural vehicular o GLP, durante su funcionamiento en velocidad de crucero y en condición de marcha mínima, ralentí o prueba estática, a temperatura normal de operación, operando con gas natural vehicular o GLP, respectivamente.

Tabla 2. Límites máximos de emisión permisibles para vehículos convertidos a gas natural vehicular o GLP

Año modelo	CO (%)	HC (ppm)
1970 y anterior	5,0	800
1971 – 1984	4,0	650
1985 – 1997	3,0	400
1998 y posterior	1,0	200

Parágrafo: A partir de los vehículos año modelo 2010, los comercializadores representantes de marca, importadores, fabricantes o ensambladores de dichos vehículos deberán garantizar una emisión máxima permisible equivalente al 80% del valor establecido en la Tabla 2 para los vehículos con año modelo 1998 y posterior.

Anexo 2. Componentes de un Kit de conversión



Figura 12. Componentes de un Kit de conversión

Fuente: Conversiones GNV La Isla (2012)

Anexo 3. Ajustes generales del Generador Eléctrico



a) Aceite 10W-30



b) Lavado del filtro de aire



c) Limpieza bujía



d) Tubo para gases de escape

Figura 13. Ajustes previos

Fuente: Autores (2017). Registro fotográfico

Anexo 4. Kit de conversión empleado



a) Regulador de 3 Etapas



c) Conmutador GNV-Gasolina (izq.) y Electroválvula de gasolina (der.)



c) Cilindro y tubería de alta presión

Figura 14. Kit de conversión empleado

Fuente: Autores (2017). Registro fotográfico

Anexo 5. Mecanismo de oxigenación



a) Filtro sin modificar (izq.) y Filtro modificado (der.)



Figura 15. Mecanismo de oxigenación

Fuente: Autores (2017). Registro fotográfico

Anexo 6. Realización de las Pruebas



a) Prueba GNV



b) Sonda para el análisis de gases



c) Resultados del analizador de gases

Figura 16. Realización de las pruebas

Fuente: Autores (2017). Registro fotográfico

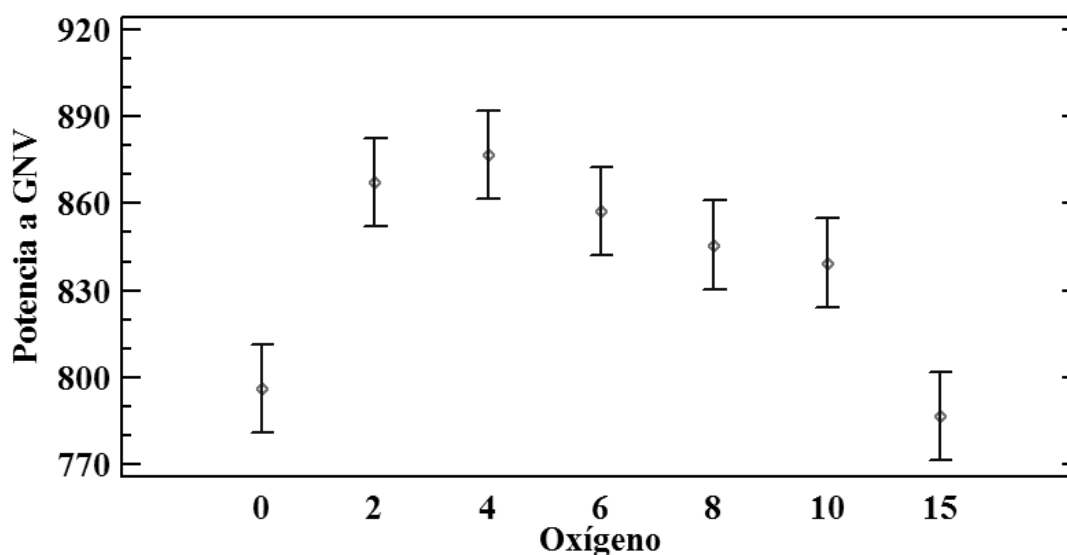
Anexo 7. Medias e intervalos para la potencia

Tabla 25. Medias para Potencia por Oxígeno

Fuente: Autores (2017). Análisis Software StatGraphics®

<i>Oxígeno</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Error Est. (s agrupada)</i>	<i>Límite Inferior</i>	<i>Límite Superior</i>
2	5	867,464	11,1657	851,169	883,759
4	5	877,013	11,1657	860,717	893,308
6	5	857,307	11,1657	841,012	873,602
8	5	845,704	11,1657	829,409	861,999
10	5	839,535	11,1657	823,24	855,83
15	5	786,386	11,1657	770,091	802,681
Total	30	845,568			

Esta tabla muestra la media de Potencia para cada nivel de Oxígeno. También muestra el error estándar de cada media, el cual es una medida de la variabilidad del muestreo, muestra un intervalo alrededor de cada media basados en el procedimiento de la diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher, los cuales están contruidos de tal manera que, si dos medias son iguales, sus intervalos se traslaparán un 95,0% de las veces.



Gráfica 12. Medias con 95 % LSD de Fisher

Fuente: Autores (2017). Análisis Software StatGraphics®

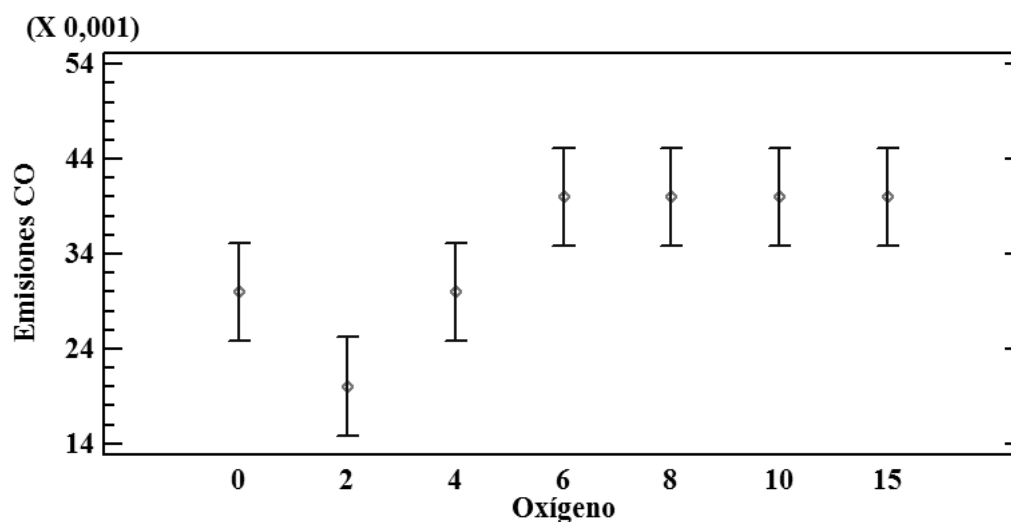
Anexo 8. Medias e intervalos las emisiones de CO

Tabla 26. Medias para Emisiones CO por Oxígeno

Fuente: Autores (2017). Análisis Software StatGraphics®

Oxígeno	Casos	Media	Error Est. (s agrupada)	Límite Inferior	Límite Superior
0	5	0,03	0,00358569	0,0248063	0,0351937
2	5	0,02	0,00358569	0,0148063	0,0251937
4	5	0,03	0,00358569	0,0248063	0,0351937
6	5	0,04	0,00358569	0,0348063	0,0451937
8	5	0,04	0,00358569	0,0348063	0,0451937
10	5	0,04	0,00358569	0,0348063	0,0451937
15	5	0,04	0,00358569	0,0348063	0,0451937
Total	35	0,0342857			

Esta tabla muestra la media de los CO para cada nivel de Oxígeno. También muestra el error estándar de cada media, el cual es una medida de la variabilidad del muestreo, muestra un intervalo alrededor de cada media basados en el procedimiento de la diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher, los cuales están contruidos de tal manera que, si dos medias son iguales, sus intervalos se traslaparán un 95,0% de las veces.



Gráfica 13. Medias con 95 % LSD de Fisher

Fuente: Autores (2017). Análisis Software StatGraphics®

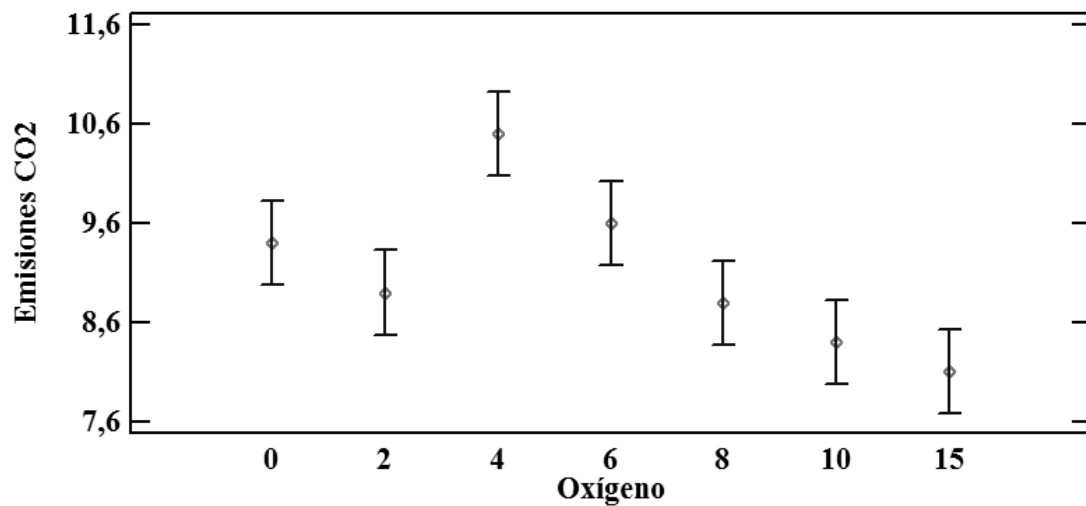
Anexo 9. Medias e intervalos para las emisiones de CO₂

Tabla 27. Medias para Emisiones CO₂ por Oxígeno

Fuente: Autores (2017). Análisis Software StatGraphics®

<i>Oxígeno</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Error Est. (s agrupada)</i>	<i>Límite Inferior</i>	<i>Límite Superior</i>
0	5	9,4	0,293987	8,97418	9,82582
2	5	8,9	0,293987	8,47418	9,32582
4	5	10,5	0,293987	10,0742	10,9258
6	5	9,6	0,293987	9,17418	10,0258
8	5	8,8	0,293987	8,37418	9,22582
10	5	8,4	0,293987	7,97418	8,82582
15	5	8,1	0,293987	7,67418	8,52582
Total	35	9,1			

Esta tabla muestra la media de los CO₂ para cada nivel de Oxígeno. También muestra el error estándar de cada media, el cual es una medida de la variabilidad del muestreo, muestra un intervalo alrededor de cada media basados en el procedimiento de la diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher, los cuales están contruidos de tal manera que, si dos medias son iguales, sus intervalos se traslaparán un 95,0% de las veces.



Gráfica 14. Medias con 95 % LSD de Fisher

Fuente: Autores (2017). Análisis Software StatGraphics®

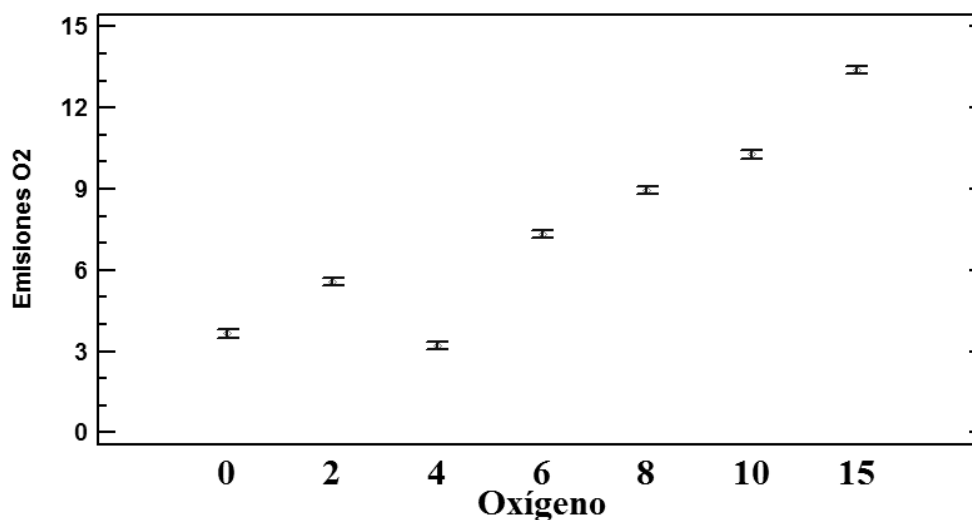
Anexo 10. Medias e intervalos para las emisiones de O₂

Tabla 28. Medias para Emisiones O₂ por Oxígeno

Fuente: Autores (2017). Análisis Software StatGraphics®

<i>Oxígeno</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Error Est. (s agrupada)</i>	<i>Límite Inferior</i>	<i>Límite Superior</i>
0	5	3,65	0,105228	3,49758	3,80242
2	5	5,58	0,105228	5,42758	5,73242
4	5	3,2	0,105228	3,04758	3,35242
6	5	7,34	0,105228	7,18758	7,49242
8	5	8,96	0,105228	8,80758	9,11242
10	5	10,28	0,105228	10,1276	10,4324
15	5	13,4	0,105228	13,2476	13,5524
Total	35	7,48714			

Esta tabla muestra la media de los CO₂ para cada nivel de Oxígeno. También muestra el error estándar de cada media, el cual es una medida de la variabilidad del muestreo, muestra un intervalo alrededor de cada media basados en el procedimiento de la diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher, los cuales están contruidos de tal manera que, si dos medias son iguales, sus intervalos se traslaparán un 95,0% de las veces.



Gráfica 15. Medias con 95 % LSD de Fisher

Fuente: Autores (2017). Análisis Software StatGraphics®

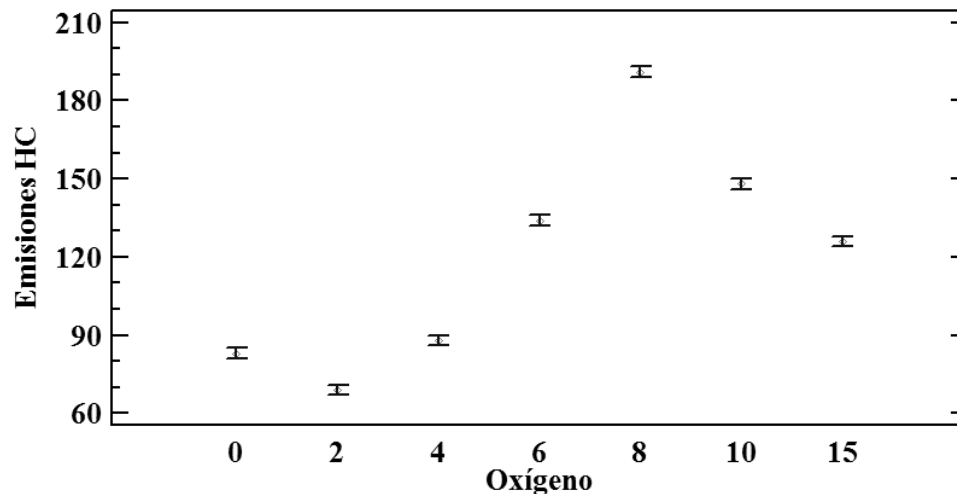
Anexo 11. Medias e intervalos para las emisiones de HC

Tabla 29. Medias para Emisiones HC por Oxígeno

Fuente: Autores (2017). Análisis Software StatGraphics®

<i>Oxígeno</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Error Est. (s agrupada)</i>	<i>Límite Inferior</i>	<i>Límite Superior</i>
0	5	83,0	1,38358	80,996	85,004
2	5	69,0	1,38358	66,996	71,004
4	5	88,0	1,38358	85,996	90,004
6	5	134,0	1,38358	131,996	136,004
8	5	191,0	1,38358	188,996	193,004
10	5	148,0	1,38358	145,996	150,004
15	5	126,0	1,38358	123,996	128,004
Total	35	119,857			

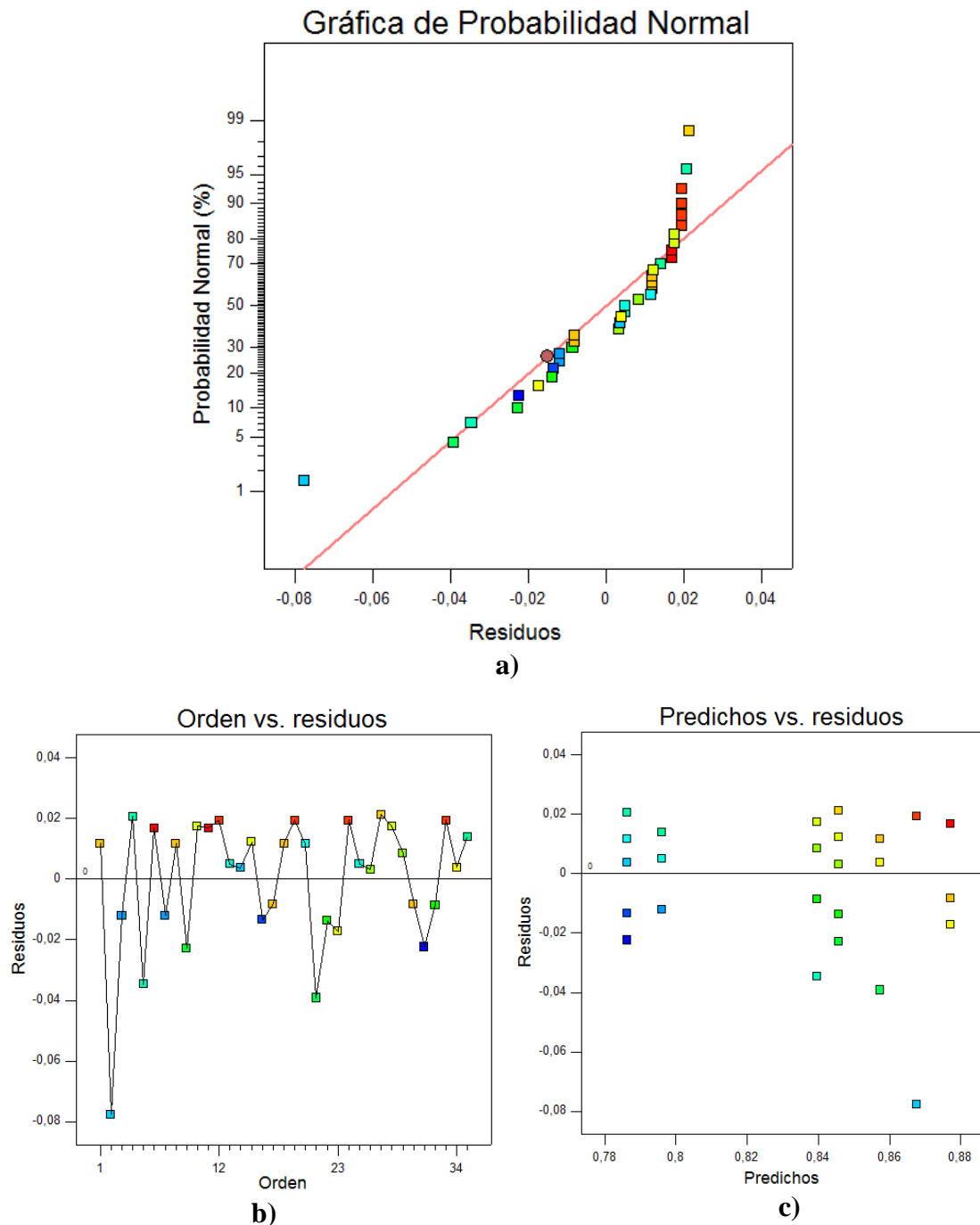
Esta tabla muestra la media de las emisiones de HC para cada nivel de Oxígeno. También muestra el error estándar de cada media, el cual es una medida de la variabilidad del muestreo, muestra un intervalo alrededor de cada media basados en el procedimiento de la diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher, los cuales están contruidos de tal manera que, si dos medias son iguales, sus intervalos se traslaparán un 95,0% de las veces.



Gráfica 16. Medias con 95 % LSD de Fisher

Fuente: Autores (2017). Análisis Software StatGraphics®

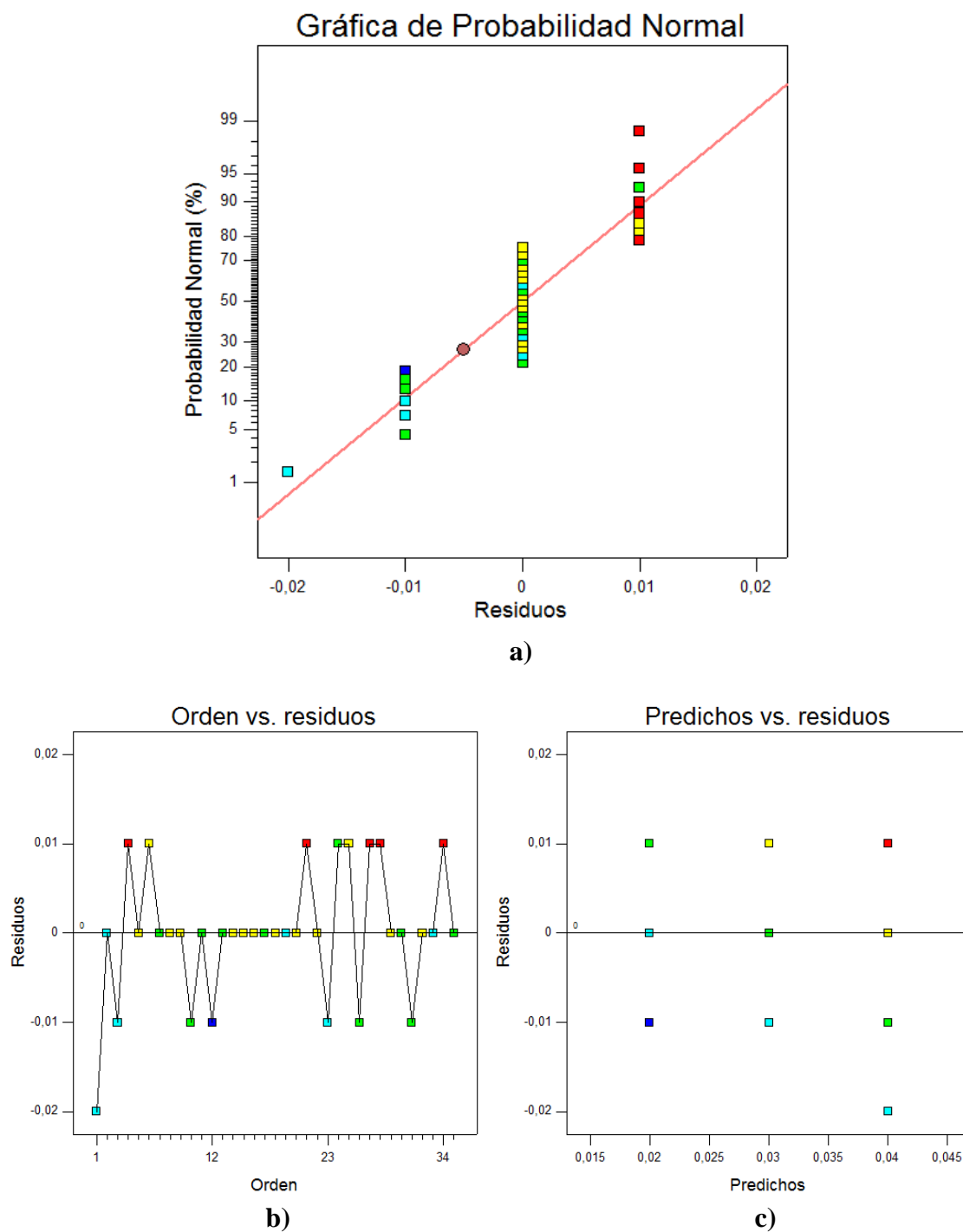
Anexo 12. Verificación del modelo para la potencia



Gráfica 17. Verificación de los datos de Potencia

Fuente: Autores (2017). *Análisis Software Design-Expert®*

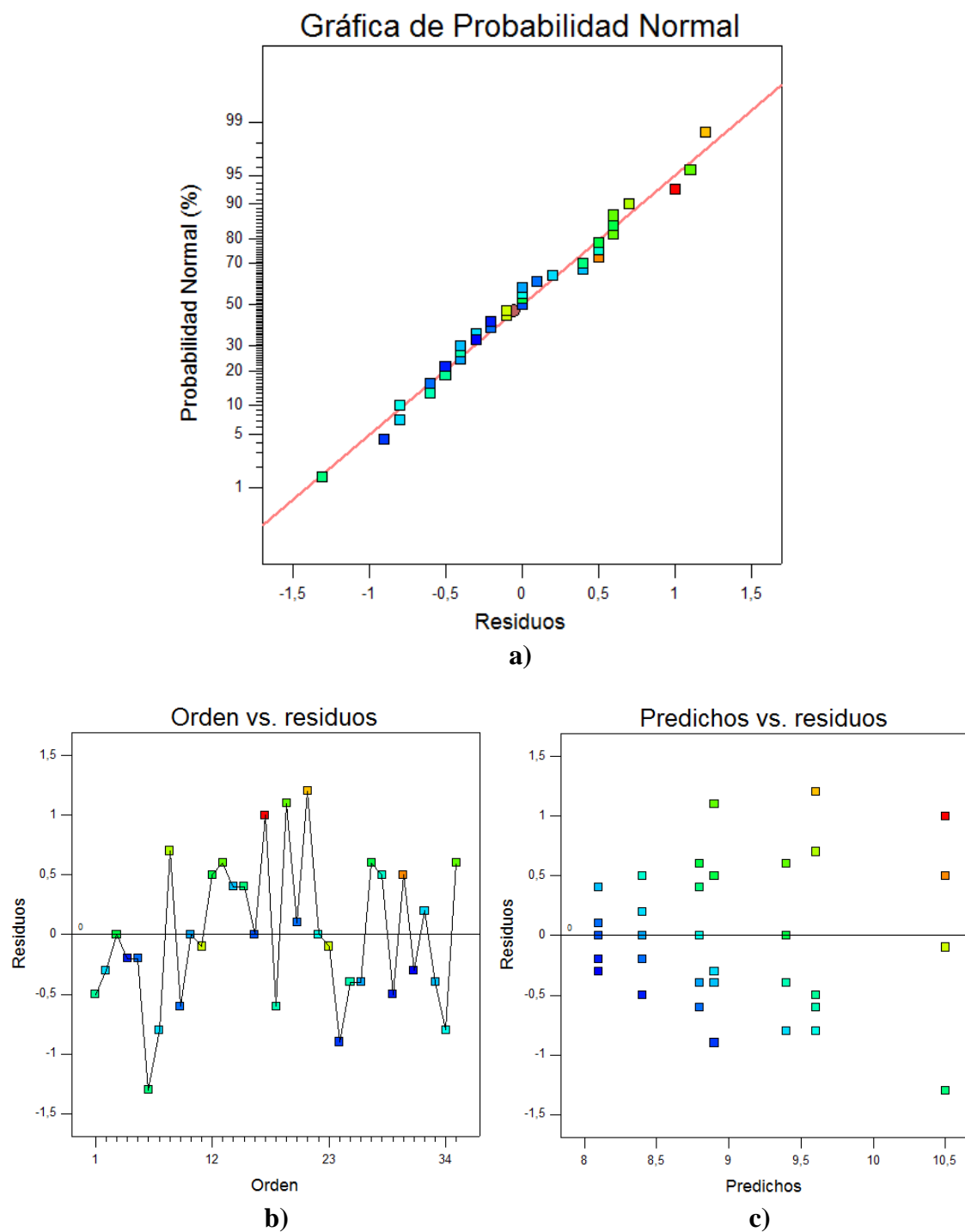
Anexo 13. Verificación del modelo para las emisiones de CO



Gráfica 18. Verificación de los datos de CO

Fuente: Autores (2017). *Análisis Software Design-Expert®*

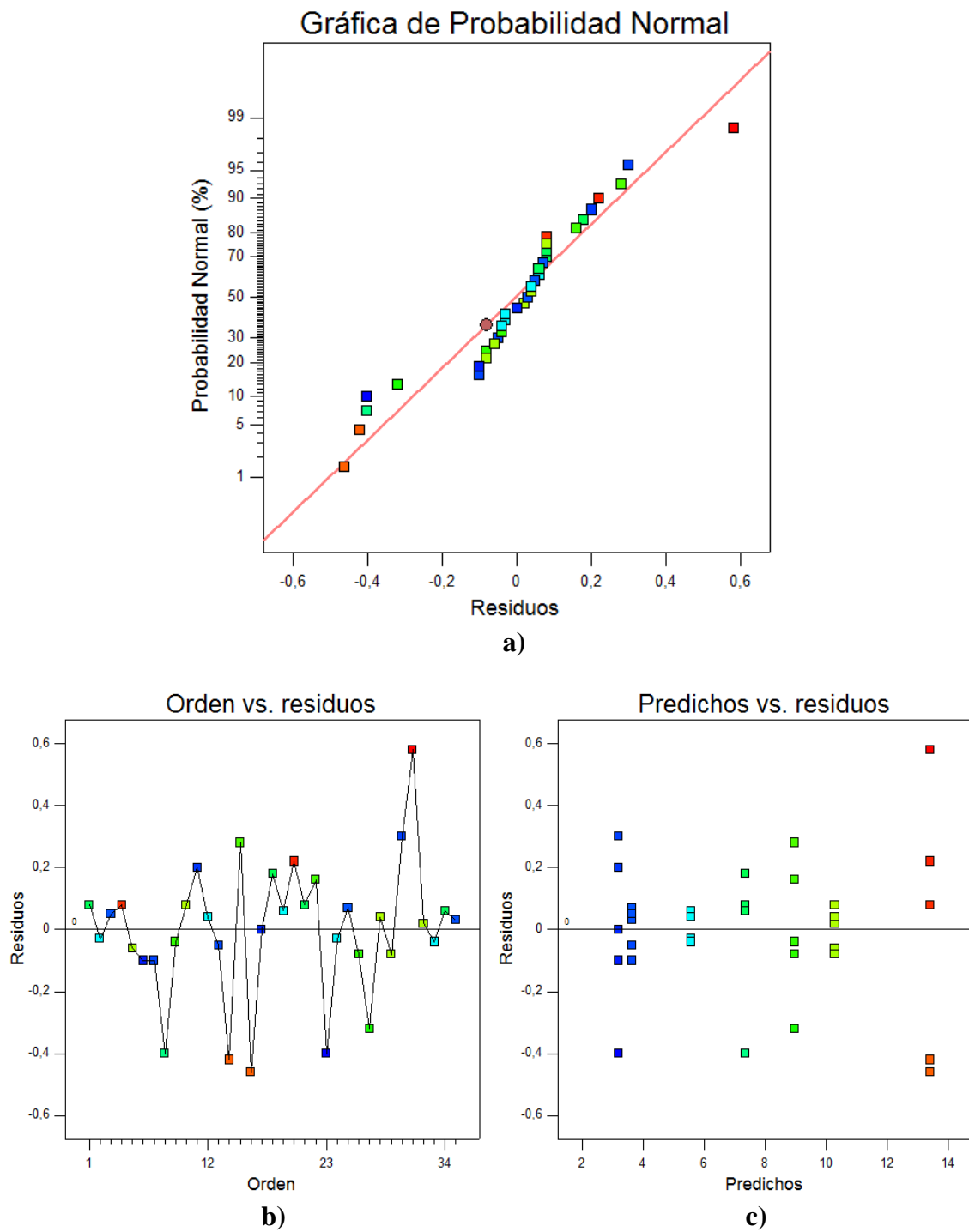
Anexo 14. Verificación del modelo para las emisiones de CO₂



Gráfica 19. Verificación de los datos de CO₂

Fuente: Autores (2017). *Análisis Software Design-Expert®*

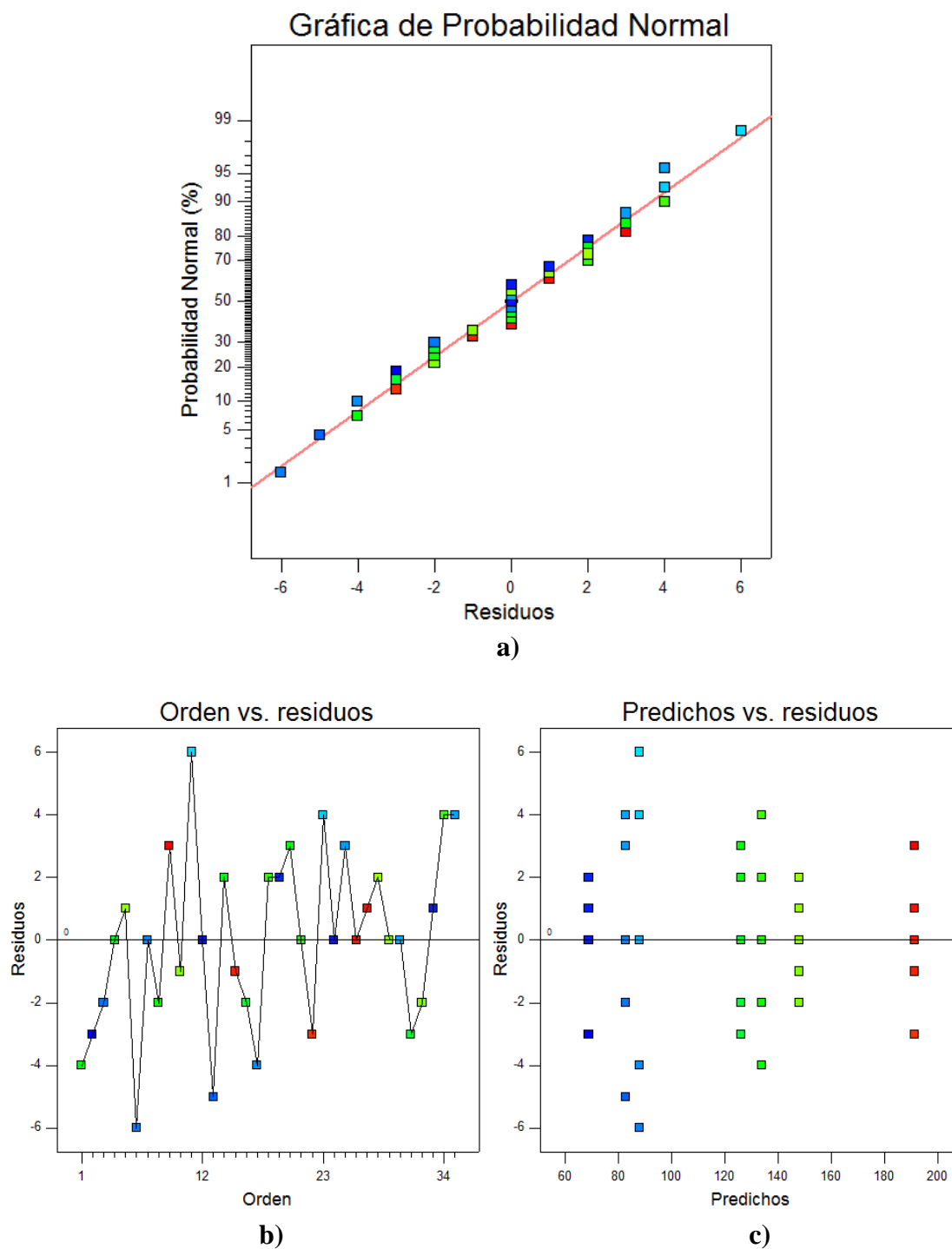
Anexo 15. Verificación del modelo para las emisiones de O₂



Gráfica 20. Verificación de los datos de O₂

Fuente: Autores (2017). Análisis Software Design-Expert®

Anexo 16. Verificación del modelo para las emisiones de HC



Gráfica 21. Verificación de los datos de HC

Fuente: Autores (2017). Análisis Software Design-Expert®